

# UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD – LYON I DOSSIER D'HABILITATION A DIRIGER LES RECHERCHES

*Spécialité Astrophysique*

par

**Johan RICHARD**

## **Propriétés Physiques des Galaxies Distantes sous la loupe des Amas-lentilles**

Soutenue le 12 septembre 2012 devant le Jury :

Bruno Guiderdoni .....	Président
Françoise Combes .....	Rapportrice
Geneviève Soucail .....	Rapportrice
Thierry Contini .....	Rapporteur
Thomas Buchert .....	Examineur
Jean-Paul Kneib .....	Examineur

Centre de Recherche Astrophysique de Lyon – UMR 5574  
Observatoire de Lyon  
9, avenue Charles André  
69561 Saint-Genis Laval  
FRANCE





# Table des matières

<i>Curriculum Vitae</i>	5
Introduction	7
<b>1 Amas de Galaxies utilisés comme <i>Télescopes Gravitationnels</i></b>	<b>9</b>
1.1 Contexte : Modèles de Masse Paramétriques . . . . .	9
1.2 Modélisation précise d'amas très contraints . . . . .	11
1.2.1 Abell 1689 . . . . .	11
1.2.2 Abell 1703 . . . . .	12
1.2.3 Abell 370 . . . . .	13
1.3 Propriétés statistiques des amas lentilles . . . . .	15
1.4 Perspectives . . . . .	18
<b>2 Propriétés résolues des Galaxies Distantes</b>	<b>21</b>
2.1 Contexte . . . . .	21
2.2 Spectroscopie 3D d'arcs gravitationnels . . . . .	22
2.2.1 Procédure utilisée . . . . .	22
2.2.2 Dynamique du gaz . . . . .	23
2.2.3 Gradients de métallicité . . . . .	26
2.3 Paramètres physiques des régions de formation stellaire . . . . .	28
2.4 Perspectives . . . . .	31
<b>3 Propriétés intégrées des Galaxies Distantes</b>	<b>35</b>
3.1 Contexte . . . . .	35
3.2 Les émetteurs Lyman- $\alpha$ faibles et la relation taille-masse . . . . .	38
3.3 La relation masse-métallicité . . . . .	41
3.4 Les galaxies poussiéreuses distantes . . . . .	43
3.5 Perspectives . . . . .	47
<b>Liste des publications</b>	<b>51</b>
Revue à comité de lecture . . . . .	51
Comptes-rendus de conférences et colloques . . . . .	55
Rapports techniques . . . . .	57

Communiqués de presse . . . . .	58
<b>Activités d'enseignement</b>	<b>59</b>
<b>Autres Activités</b>	<b>61</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>62</b>

# Curriculum Vitae

## Johan RICHARD - Astronome-Adjoint

Centre de Recherche Astrophysique de Lyon      Tel : 04 78 86 83 81  
9 avenue Charles Andre      johan.richard@univ-lyon1.fr  
69561 SAINT-GENIS-LAVAL

Né le 5 Janvier 1980 à Dourdan (91), nationalité française, marié

**Depuis le 1 janvier 2011** Astronome-adjoint au CRAL, titularisé 1er janvier 2012

**23 août 2010 - 1 janvier 2011** Postdoctorat T. Brahé, Université de Copenhague

**1 Septembre 2008 - 1 septembre 2010** Postdoctorat sur bourse Marie-Curie, Université de Durham

**1 Octobre 2005 - 1 septembre 2008 :** Postdoctorat en cosmologie observationnelle au California Institute of Technology (CalTech), dans le groupe de Richard Ellis.

## Thèse (2005) - Toulouse III (Paul Sabatier) - LATT

Propriétés des premières étoiles et galaxies - contraintes sur les modèles de formation des galaxies. Mention : très honorable. *Directeurs de thèse : Roser Pelló, Jean-Paul Kneib.*

## Education

Juil. 2002 - Sept. 2005 : Doctorat astrophysique, Toulouse III, au LATT

Sept. 2001 - Juin 2002 : M2 Astrophysique, Toulouse III mention très bien. Classé 1er.

Sept. 1999 - Sept. 2002 : Ingénieur Sup'Aéro (Toulouse), option techniques spatiales.

## Autre expérience de recherche

Mars-Juin 2002 : Stage de M2 astrophysique a Caltech et au LATT.

Emetteurs Lyman- $\alpha$  fortement amplifiés par des amas-lentilles.

*Direction : Richard Ellis (Caltech), Jean-Paul Kneib (LATT).*

Juin-Août 2001 : Stage de recherche au LATT (Toulouse), dans le groupe cosmologie.

Etude d'un échantillon d'amas-lentilles a  $z \sim 0.2$ .

*Direction : Jean-Paul Kneib*

Juil.-Août 2000 : Stage de recherche a l'IAP (Paris), dans le groupe "hautes energies".

Precision numerique dans des simulations de nucleosynthese primordiale.  
*Direction : Elisabeth Vangioni-Flam.*

## Connaissances

- **Langues** : Français, Anglais, Espagnol : couramment lus, écrits, parlés. Allemand et Japonais : bon niveau.
- **Informatique** : Unix/Linux/Windows/MacOS, C, C++, Java, HTML, Fortran, UML, Perl, LaTeX, IRAF, IDL, Python.
- **Observations** : Observateur régulier au Keck avec LRIS, ESI, DEIMOS, NIRSPEC, NIRC, au VLT avec ISAAC, FORS, SINFONI, au Magellan avec LDSS2/LDSS3, au Subaru avec MOIRCS, imagerie et spectroscopie dans le visible et proche-infrarouge. Imagerie spatiale (HST, Spitzer). Observations radio (IRAM/30m).
- **Réduction de données** : très bonne connaissances des procédures de réduction en imagerie et spectroscopie (données sol ou spatiales), développement de routines spécifiques sous IRAF, IDL et Python. Réduction de données ALMA.
- **Instrumentation** : développement logiciel pour le simulateur d'EMIR sur le Grante-can, durant ma thèse. Simulations pour le cas scientifique d'EAGLE (futur instrument pour l'EELT). Développements logiciels pour MUSE/VLT depuis 2009.

# Introduction

Ce dossier contient une présentation de mes travaux de recherche, tâches d'enseignement et autres activités effectuées ces dernières années en postdoctorat et depuis mon recrutement à l'Université Claude Bernard comme astronome adjoint.

Ma thématique principale de recherche concerne l'étude de la formation et de l'évolution des galaxies les plus distantes dans un contexte cosmologique. En particulier, je me base sur des observations extragalactiques utilisant les amas de galaxies massifs comme des télescopes gravitationnels. Ces observations couvrent un large domaine de longueurs d'onde, du visible aux ondes radio, et différentes techniques (imagerie, spectroscopie, spectro-imagerie et interférométrie). Leur interprétation nécessite également une bonne connaissance de l'effet de lentille gravitationnelle, pris en compte en construisant des modèles de distribution de masse de ces amas.

Mes travaux de recherche sont détaillés dans les trois chapitres suivants. Le premier chapitre présente le travail de modélisation d'amas de galaxies massifs, préliminaire à leur utilisation comme lentilles. Leur distribution de masse est construite à partir des mesures effectuées sur les galaxies d'arrière-plan et produisant des images multiples par amplification gravitationnelle forte.

Je détaille dans le deuxième chapitre l'étude de galaxies distantes observées à haute résolution : l'amplification gravitationnelle augmente en effet la taille angulaire de ces objets, permettant de résoudre leur champ de vitesse ou leur morphologie interne. Ces informations sont mises en contexte avec les modèles de formation et d'évolution de galaxies. Les propriétés des régions de formation stellaire peuvent être comparées avec des observations similaires de galaxies dans l'Univers local.

Enfin, dans le troisième chapitre sont présentés les résultats sur les propriétés intégrées (non résolues) de galaxies distantes intrinsèquement très faibles. L'augmentation du flux total de ces objets permet de mesurer leur masse, métallicité, et d'étudier les galaxies poussiéreuses par une approche multi-longueur d'onde. Je détaille en particulier les résultats obtenus sur les relation globales dans les galaxies distantes (relation taille-masse, masse-métallicité) ainsi que la nouvelle fenêtre d'observation offerte par des instruments comme Herschel et ALMA.

Les perspectives des ces travaux sont présentés en fin de chaque chapitre. Les derniers chapitres regroupent les informations sur mes publications, mes activités d'enseignement, mes encadrements d'étudiants et les autres activités (tâches de service et administratives) associées à mon statut d'astronome-adjoint.





# Chapitre 1

## Amas de Galaxies utilisés comme *Télescopes Gravitationnels*

### 1.1 Contexte : Modèles de Masse Paramétriques

Les amas de galaxies sont les structures virialisées les plus massives de notre Univers, et par conséquent ils agissent comme de puissantes *lentilles gravitationnelles*. Au cœur d'un de ces amas, la déflexion de la lumière provenant d'une galaxie source en arrière-plan (ou lentillage) entraîne une *amplification* de l'image observée qui va dépendre du potentiel de l'amas, de sa distance, ainsi que de la position (alignement et distance) de la galaxie source (Schneider et al., 1992). Cette amplification correspond à un élargissement angulaire de l'image de la galaxie (à brillance de surface constante). Afin de mesurer cet effet, et ultérieurement le corriger, on va se servir d'un modèle de la distribution de masse de l'amas pour en déduire son potentiel gravitationnel, unique pour l'ensemble des galaxies *lentillées* (Kneib et al., 1996).

Les informations disponibles pour contraindre un tel modèle proviennent des *images multiples* d'une même galaxie source, qui se forment dans la région d'amplification maximale de l'amas (Fig. 1.1). Les positions de ces images multiples, qui suivent une configuration géométrique spécifique, contraignent le potentiel de l'amas à un rayon donné (Renn et al., 1997). En particulier, dans le cas d'une distribution de masse à symétrie circulaire, un arc gravitationnel multiple à la distance angulaire  $\theta_E$  du centre de l'amas (appelé dans ce cas rayon d'Einstein) contraint la masse projetée contenue à l'intérieur d'un cercle de rayon  $\theta_E$  :

$$M(< \theta_E) = \frac{c^2}{4G} \frac{D_{OS} D_{OL}}{D_{LS}} \theta_E^2 \quad (1.1)$$

où  $D_{OS}$ ,  $D_{OL}$  et  $D_{LS}$  correspondent respectivement aux distances entre l'observateur et la source, l'observateur et la lentille, la lentille et la source. Par conséquent, la position des images multiples contraint l'allure générale du potentiel de masse, tandis que la distance de la source est nécessaire pour contraindre la valeur de la masse.

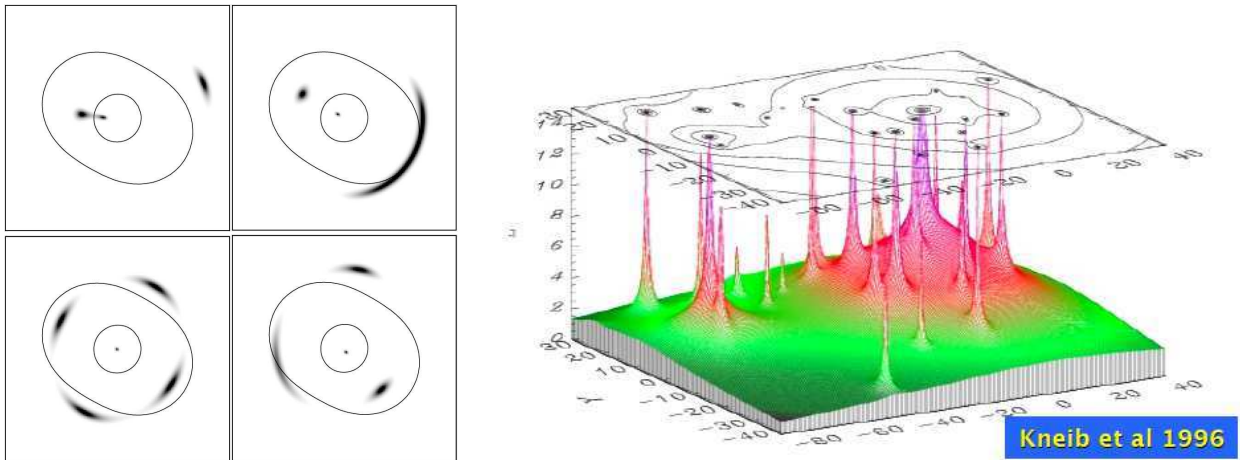


FIGURE 1.1 – À gauche : différentes configurations possibles pour des images multiples. Dans l’ordre de lecture : un arc radial et sa contre-image, un arc géant, une croix d’Einstein, une configuration avec un arc tangentiel en ‘fold’ (d’après Kneib 1993). À droite : Représentation de la distribution de masse dans un amas : on distingue un profil général à grande échelle et de multiples pics locaux correspondant aux sous-structures, et localisées à la position des pics de lumière des galaxies individuelles de l’amas.

Une fois un modèle d’amas construit, il peut être utilisé pour trouver d’autres systèmes d’images multiples et raffiner itérativement le modèle (voir par exemple Campusano et al. 2001). On peut en effet prédire la position et le rapport de flux des contre-images qui permettent, une fois confirmées, de corroborer le modèle.

Il existe principalement deux familles de modèles d’amas contraints par la présence d’images multiples. Les modèles *paramétriques* sont traditionnellement les plus utilisés (Mellier et al. 1993) et se basent sur l’hypothèse d’une représentation mathématique simple du potentiel de masse. En général, ces modèles supposent que le potentiel de l’amas peut être vu comme la superposition d’un ou plusieurs potentiels dominants à grande échelle ( $\sim 1$  Mpc : halos de matière noire, gaz X intra-amas) et d’un grand nombre de potentiels à petite échelle correspondant aux galaxies d’amas (10-100 kpc, Fig. 1.1). Le choix des potentiels servant de base à la construction des modèles provient des résultats de simulations numériques d’amas de galaxies et des halos de matière noire associés. Les plus utilisés sont la sphère isotherme, la sphère pseudo-isotherme (avec un aplatissement au coeur), le modèle NFW (Navarro et al., 1997), et leurs équivalents avec un support géométrique elliptique (Golse & Kneib, 2002). Pour limiter le nombre de paramètres à contraindre, on émet souvent l’hypothèse que “la lumière trace la masse”, c’est à dire que ces potentiels galactiques suivent une relation d’échelle simple avec la lumière stellaire observée.

Les modèles *non-paramétriques* ont vu le jour avec la découverte d’amas-lentilles possédant un grand nombre d’images multiples (voir par exemple Limousin et al. 2007). Leur avantage principal est de ne supposer peu ou pas d’a priori sur la distribution de masse, mais de contraindre directement la masse répartie sur une grille (régulière

ou non). Cela revient à contraindre un modèle à très grand nombre de paramètres (les éléments de la grille) : l'ajustement est par conséquent parfait (ou presque parfait) mais contient des dégénérescences. Parmi la famille de modèles offrant un bon ajustement, on utilise des informations a posteriori (comme par exemple la positivité de la masse) pour sélectionner les modèles corrects. Un inconvénient supplémentaire des modèles non-paramétriques est leur forte dépendance vis à vis du choix des contraintes, notamment l'identification des systèmes d'images multiples, là où un modèle paramétrique permet de quantifier la précision relative d'un modèle pour reproduire différents systèmes.

Pour ces raisons, mon travail s'est principalement focalisé sur des modèles de masse paramétriques, construits grâce au logiciel de modélisation *Lenstool*<sup>1</sup> (Kneib, 1993; Jullo et al., 2007) pour lequel j'ai effectué plusieurs développements. A noter qu'il est maintenant possible d'utiliser des méthodes hybrides (Jullo & Kneib, 2009) combinant les avantages de l'approche paramétrique et non paramétrique.

## 1.2 Modélisation précise d'amas très contraints

Au cours de mes postdoctorats à Caltech et Durham, j'ai travaillé en collaboration avec Jean-Paul Kneib et Marceau Limousin du Laboratoire d'Astrophysique de Marseille sur la modélisation des amas de galaxies contenant le plus grand nombre d'images multiples connu. Mon travail a consisté à observer ces amas à l'aide du spectrographe LRIS sur le télescope Keck, afin de mesurer les distances des images multiples, puis à participer à la modélisation (itérative) des modèles de masse et à leur interprétation. Je détaille ici les résultats obtenus sur trois amas massifs qui ont donné lieu à des publications individuelles. Ces amas bénéficient d'observations profondes par le télescope spatial *Hubble* dans plusieurs bandes.

### 1.2.1 Abell 1689

*Limousin et al. (2007)*

Dès les premières images de l'amas Abell 1689 prises par *Hubble* en 1999, plusieurs systèmes d'images multiples ont été identifiés, et des premières observations ont été effectuées avec le spectrographe FORS/VLT pour en mesurer les décalages spectraux. Les nouvelles images obtenues en 2002 avec l'*Advanced Camera for Surveys* (ACS), très profondes, ont révélé que Abell 1689 contient le plus grand nombre d'images multiples connu à ce jour pour un amas. Son rayon d'Einstein et sa géométrie en font un exemple unique pour l'amplification des galaxies distantes (Fig. 1.2).

J'ai poursuivi avec mon collaborateur Graham Smith (Université de Birmingham) le suivi spectroscopique de ces systèmes, et nous avons pu mesurer le décalage spectral de 25 systèmes parmi les 40 identifiés. Nous avons ainsi pu tester la robustesse de ces différents systèmes. Fort de ce très grand nombre de contraintes, un modèle paramétrique a été

---

1. Disponible publiquement à la page <http://lamwvs.oamp.fr/lenstool/>



FIGURE 1.2 – À gauche : vue générale de l’amas Abell 1689 observé par la caméra ACS sur Hubble. À droite : agrandissement de la zone marquée d’un rectangle, montrant plusieurs systèmes d’images multiples, y compris un arc tangentiel très étendu.

construit et permet de reproduire l’ensemble des images avec une précision de  $\sim 2.5''$ . Ce modèle a pu être comparé aux mesures de l’effet de lentille faible (ou *weak-lensing*), qui provoque un étirement statistique à grande échelle sur les galaxies d’arrière-plan, et les informations sur la dynamique de l’amas.

Notre étude a montré que les valeurs du paramètre de concentration (qui correspond à la forme du profil de masse) mesurées sur notre modèle étaient en accord avec les études *weak-lensing* effectuées par Umetsu & Broadhurst (2008) sur des images Subaru. Le modèle de masse précédemment publié par Broadhurst et al. (2005) était en désaccord mais n’utilisait qu’un seul décalage spectral, ce qui montre tout l’intérêt de faire ces mesures spectroscopiques sur les systèmes d’images multiples. La masse totale contenue dans le cœur de l’amas est supérieure à  $10^{15} M_{\odot}$ , mais n’explique pas la dispersion de vitesse mesurée entre les membres de l’amas, supérieure à 2300 km/s. Il semblerait plutôt que l’état dynamique de Abell 1689 soit très complexe, et contiendrait plusieurs structures de dispersion de vitesse  $\sim 1000 - 1500$  km/s superposées sur la ligne de visée. Cette superposition explique l’efficacité de l’amas comme lentille gravitationnelle.

### 1.2.2 Abell 1703

*Limousin et al. (2008)*

*Richard et al. (2009)*

Les observations du télescope spatial Hubble sur l'amas massif Abell 1703, obtenues en 2005, ont montré une distribution de galaxies d'amas en forme de filament, couvrant la taille du champ de la caméra ACS. Dans la région centrale, des systèmes multiples ont été identifiées dans une région quasi-circulaire de diamètre  $\sim 50''$  autour d'une galaxie centrale dominante. Ces systèmes ont été parfaitement reproduits par un modèle paramétrique simple utilisant une seule mesure de décalage spectral, que nous avons publié dans un premier article (Limousin et al., 2008). En particulier, le système mesuré correspond à une galaxie extrêmement amplifiée ( $\sim 100 \times$ ) composée de 4 images centrales en forme d'anneau (Fig. 1.3), une configuration surnommée hyperbolique-ombilique (voir par exemple Orban de Xivry & Marshall 2009). Un tel système apporte des contraintes importantes dans la région centrale de l'amas, et nous a permis de mesurer la pente à petite échelle ( $< 50$  kpc) du profil de masse. Les résultats de ce modèle, notamment la très forte amplification du système central, a été confirmée par d'autres groupes (Zitrin et al., 2010).

Par la suite, nous avons continué le suivi spectroscopique des systèmes multiples avec l'instrument LRIS, et nous avons pu mesurer le décalage spectral de 10 systèmes. Ces nouvelles contraintes ont permis d'améliorer la précision du modèle de masse et de découvrir de nouveaux systèmes plus faibles, ce qui a fait l'objet d'une seconde publication (Richard et al., 2009). Comme dans le cas d'Abell 1689, les mesures des paramètres de concentration et de rayon viriel étaient en très bon accord avec le résultat des mesures de lentillage faible jusqu'à 1 Mpc (Fig. 1.3), ce qui confirme là encore que cet amas est spécialement bien reproduit par un même modèle paramétrique (de type NFW) à petite ou grande échelle.

### 1.2.3 Abell 370

*Richard et al. (2010a)*

A la suite d'une défaillance électronique de la caméra ACS en 2008, les astronautes de la NASA ont effectué une opération de maintenance sur le télescope Hubble, procédant à la remise en route de l'instrument. Les toutes premières images de ce Hubble "revitalisé" nous sont parvenues en septembre 2009 et contenaient en particulier Abell 370, le premier amas pour lequel on a pu déterminer la distance d'un arc gravitationnel géant (Soucaïl et al., 1988). Comme il s'agissait des premières images à haute résolution de cet amas prises dans plusieurs filtres, ces nouvelles observations ont révélé des informations importantes sur les images multiples :

- 5 nouveaux systèmes ont été découverts sur ces images, et ont apporté autant de contraintes supplémentaires pour améliorer le modèle de masse de l'amas. Celui-ci montre un caractère bimodal, avec deux sous-amas chacun centré sur une galaxie de luminosité comparable (Fig. 1.4). L'arc géant est positionné autour de la composante sud.
- interprétation de l'arc géant : jusqu'à présent, les modèles de masse de l'amas supposaient que cet arc était composé de 3 images juxtaposées. L'information en couleur a révélé la structure interne de la galaxie source, qui montre une morpho-



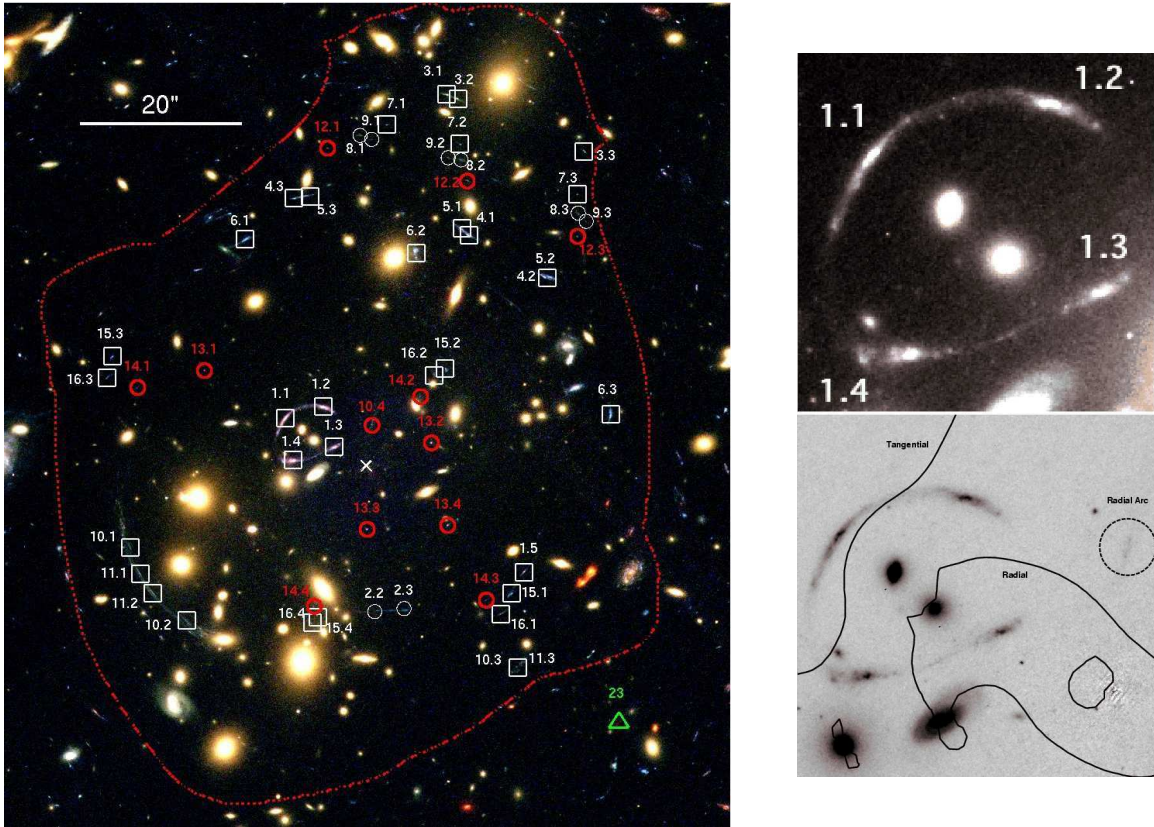


FIGURE 1.3 – Vue d’ensemble de la région centrale de l’amas Abell 1703, montrant la délimitation de la région où se produisent les images multiples (contours rouge). Les systèmes multiples marqués en blanc sont ceux de Limousin et al. (2008) et en rouge ceux de Richard et al. (2009). A droite, agrandissement du système central 1, avec 4 images brillantes en forme d’anneau.

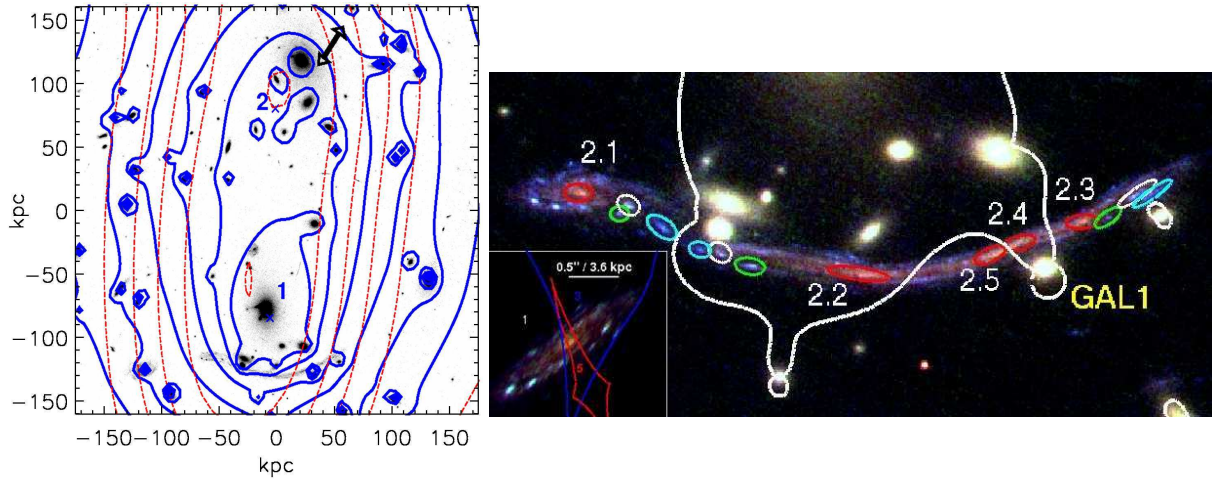


FIGURE 1.4 – A gauche : isocontours de la carte de masse reconstruite pour l’amas Abell 370 (en bleu), montrant son caractère bimodal également visible dans les observations en rayons X (contours rouges). A droite : interprétation de l’arc géant à  $z = 0.7$  en localisant les régions identiques multipliées par effet de lentille (ellipses colorées) et la ligne critique correspondante (en blanc). La morphologie de la source d’origine est visible en bas à gauche comme étant une spirale. D’après Richard et al. (2010a).

logie typique d’une galaxie spirale avec un bulbe central rouge (dû aux populations stellaires évoluées) et des bras spiraux bleus contenant des régions de formation stellaire. Cette dichotomie, ainsi que les variations de couleur entre les différentes régions de formation stellaire, ont montré qu’une partie de la source ne produisait pas d’image multiple, tandis que le bulbe central formait localement 5 images par la présence d’une galaxie d’amas (Figure 1.4, images 2.1 à 2.5).

- correspondance avec les données X : la distribution de masse bimodale résultant de notre modèle est très similaire aux observations du gaz chaud intra-amas en rayons X. On détecte en effet deux structures dont le centre en X est très proche du centre de potentiel (et de la galaxie lumineuse correspondante). Tout porte à croire que l’amas Abell 370 est observé antérieurement à un épisode de fusion, contrairement à un amas de galaxies comme le *Bullet Cluster* (Clowe et al., 2006) dans lequel le gaz chaud s’est complètement décorrélé de la matière noire à la suite d’un tel événement.

### 1.3 Propriétés statistiques des amas lentilles

*Richard et al. (2010b)*

Les amas de galaxies très contraints, comme ceux mentionnés dans la section précédente, sont encore rares : en 2005, il n’existait qu’environ 20 amas massifs bien modélisés. Afin d’augmenter le nombre d’amas (et donc le nombre de champs disponibles dans le ciel)

utilisables comme télescopes gravitationnels, plusieurs programmes ont été mis en place pour faire une recherche systématique d’amas massifs. Une des techniques de sélection se base sur l’émission en X du gaz chaud provenant du milieu intra-amas. Je participe depuis mon postdoctorat à deux sondages utilisant cette technique, dans le cadre de collaborations internationales : le Local Cluster Substructure Survey (**LoCuSS**, PI : G. Smith, université de Birmingham), et le MAssive Cluster Survey (**MACS**, PI : H. Ebeling, université d’Hawaii). Pour ces deux sondages, je participe aux observations (identification des images multiples et mesure de leurs distances) et à la modélisation de la distribution de masse au coeur des amas par étude des effets de lentille forte.

Les amas de l’échantillon LoCuSS se situent à un décalage spectral  $0.15 < z < 0.30$ , et contiennent une dizaine d’amas que nous avons publiés avant la construction de l’échantillon (notamment Abell 1689 et 1703 mentionnés précédemment, mais aussi Abell 68 et 2667 publiés respectivement dans Richard et al. 2007 et Covone et al. 2006). J’ai analysé les nouvelles images Hubble obtenues dans le cadre de cette collaboration, et mesuré le décalage spectral des images multiples identifiées dans 10 amas supplémentaires. En combinant cette information avec celle des amas précédemment publiés, j’ai procédé à une modélisation systématique de la distribution de masse des 20 amas, en utilisant pour cela la même paramétrisation, les mêmes hypothèses pour les relations d’échelle des galaxies d’amas, et le même choix de cosmologie (Richard et al., 2010b). Notamment, j’ai bénéficié du programme de suivi systématique des amas dans le proche infrarouge (bandes J et K) par la collaboration LoCuSS, données que j’ai pu utiliser pour effectuer une sélection des galaxies de l’amas dans la région centrale limitée en magnitude K (qui trace mieux la masse stellaire que la photométrie dans des filtres visibles).

Les modèles de masse ainsi construits n’ont nécessité, généralement, qu’un seul halo de matière noire à grande échelle, mais certains amas ont des morphologies plus complexes avec deux ou trois halos (Fig. 1.5). Le choix du nombre de halos est basé sur la qualité de l’ajustement du modèle et la reproduction des systèmes multiples. Néanmoins, cette étude a montré une correspondance directe entre le nombre de halos (et leur position optimisée par le modèle) avec le nombre et la position des *maxima* de luminosité sur la carte de lumière en bande K des galaxies d’amas lissée à une échelle de  $20''$ . Cette échelle correspond en effet à la distance typique permettant de distinguer la présence de deux halos par leur influence sur les images multiples.

J’ai par la suite comparé les propriétés mesurées sur cet échantillon (masse intégrée dans la région centrale de l’amas, rayon d’Einstein) avec les paramètres physiques provenant des données X (température, luminosité, masse du gaz). La distribution des rayons d’Einstein mesurés est bien ajustée par une loi lognormale (Fig. 1.6, à gauche), et est en accord avec les prédictions de halos dans des amas simulés (Broadhurst & Barkana, 2008), une fois pris en compte les biais observationnels. Également, la fraction de la masse de l’amas non présente dans le potentiel de masse central (contenue dans des sous-structures) est corrélée avec le biais entre les estimations de masse provenant de l’effet de lentille ou des données X (Fig. 1.6, à droite).

Je poursuis actuellement le même type d’analyse sur un échantillon de 45 amas



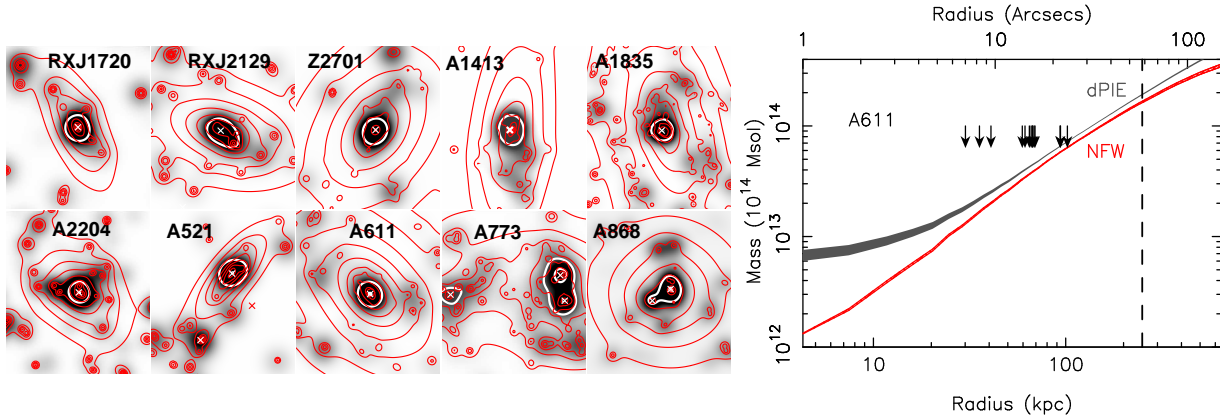


FIGURE 1.5 – A gauche : cartes de masse reconstruites pour 10 amas LoCuSS par effet de lentille forte (contours rouges) superposés aux cartes de lumière en bande K (contours blancs et niveaux de gris, représentant la distribution de masse stellaire). A droite : exemple de profil de masse reconstruit pour deux paramétrisations : NFW ou dPIE. Les distances des images multiples utilisées dans le modèle par rapport au centre de l'amas sont marquées par des flèches.

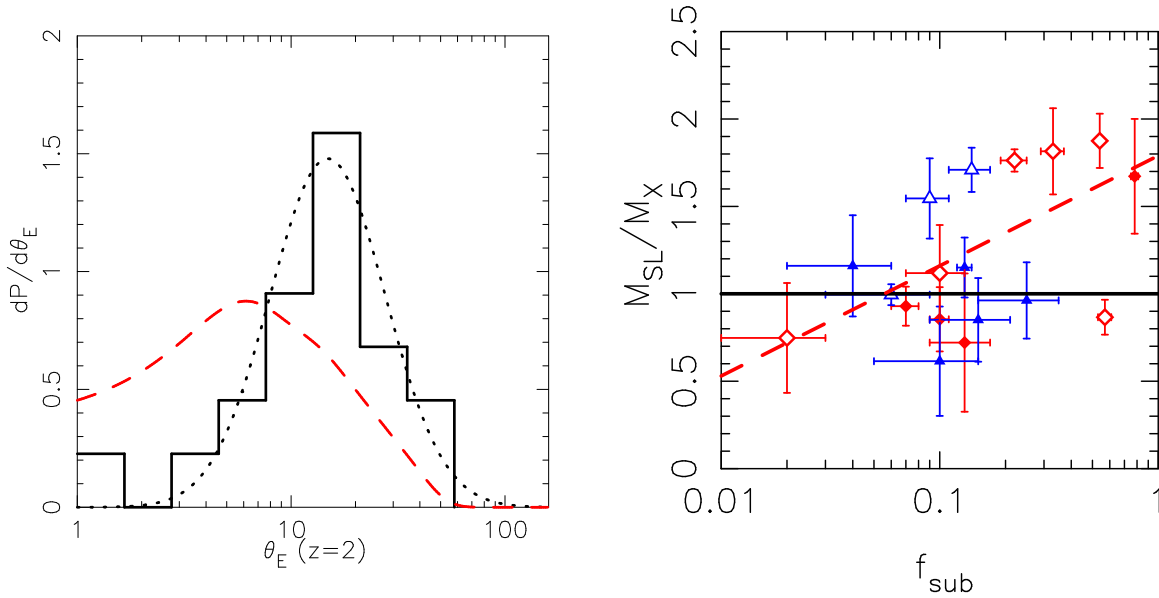


FIGURE 1.6 – A gauche : distribution de rayons d'Einstein mesurés sur 20 amas de l'échantillon LoCuSS (en noir), et comparaison avec des prédictions de simulations à  $n$  corps (courbe rouge, Broadhurst & Barkana 2008). Le biais vers les plus grands rayons d'Einstein provient de la sélection de notre échantillon (et la probabilité de trouver des images multiples pour modéliser ces amas). A droite : différences entre les mesures de la masse au coeur de ces amas par les observations en rayons X ou par modélisation de l'effet de lentille, en fonction de la quantité de sous-structures au coeur de l'amas. On voit une tendance claire avec une sous-estimation de la masse X pour les amas les moins relaxés (grande valeur de  $f_{sub}$ ).

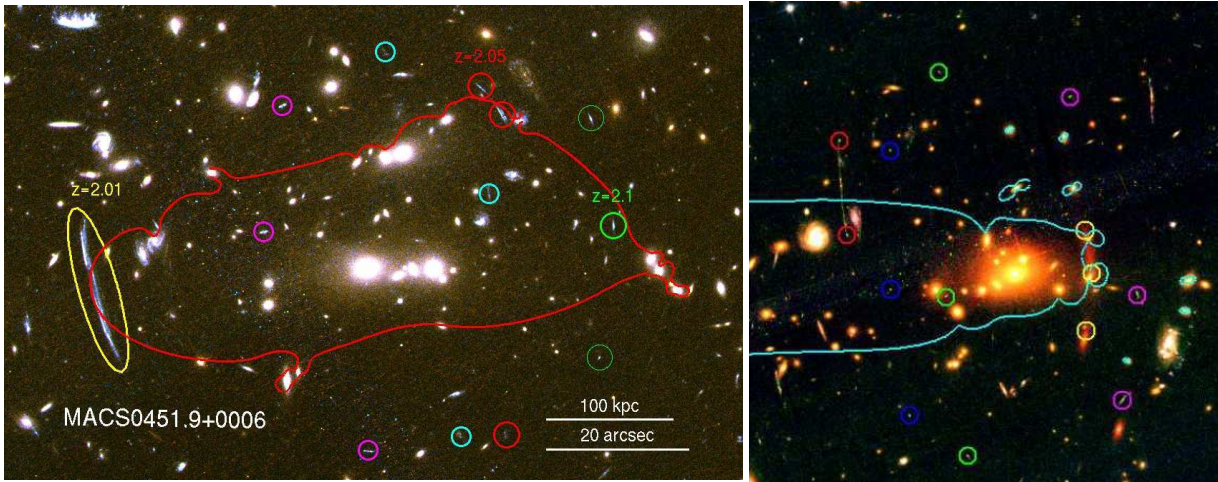


FIGURE 1.7 – Deux exemples d’amas du sondage MACS à  $0.3 < z < 0.5$ , montrant un grand nombre de systèmes multiples et leurs mesures de décalage spectral. La ligne critique est représentée dans chaque cas pour le système multiple le plus proéminent.

sélectionnés parmi le sondage MACS et situés à un décalage spectral  $0.30 < z < 0.50$ . La distance de ces amas les rend généralement plus lumineux en X que les amas LoCuSS (car les échantillons sont limités en flux X observé) et par conséquent plus massifs. Environ 90% des amas MACS pour lesquels des images ont été obtenues avec le télescope spatial montrent des systèmes d’images multiples et permettent de contraindre leur modèle de masse (Fig. 1.7).

Les résultats préliminaires de cette analyse montrent que la distribution des rayons d’Einstein pour l’échantillon MACS est, en moyenne, très similaire à celle obtenue pour les amas LoCuSS, alors que des différences sont constatées sur la répartition des amas suivant leur fraction de masse contenue dans des sous-structures. Ce premier résultat suggère peu ou pas d’évolution sur la masse des amas entre  $z = 0.2$  et  $z = 0.4$ , mais une évolution de leur structure interne avec moins d’amas relaxés dans les amas les plus distants.

## 1.4 Perspectives

Les 65 amas LoCuSS et MACS utilisés dans notre étude forment à ce jour l’échantillon le plus important d’amas lentilles modélisés d’une manière systématique. Afin de poursuivre ce travail et élargir l’échantillon, il est possible de sélectionner de nouveaux amas-lentilles de plusieurs manières :

- Échantillon CLASH (Postman et al., 2012) : un nouveau programme sur le télescope Hubble, contenant plus de 500 orbites d’observations, a obtenu des données pour 25 amas dans 12 filtres visibles et proche-infrarouge. Même si plus de la moitié des amas sélectionnés sont déjà connus (et contenus dans l’échantillon des 65 amas LoCuSS et MACS) ces données sont très intéressantes pour identifier un grand

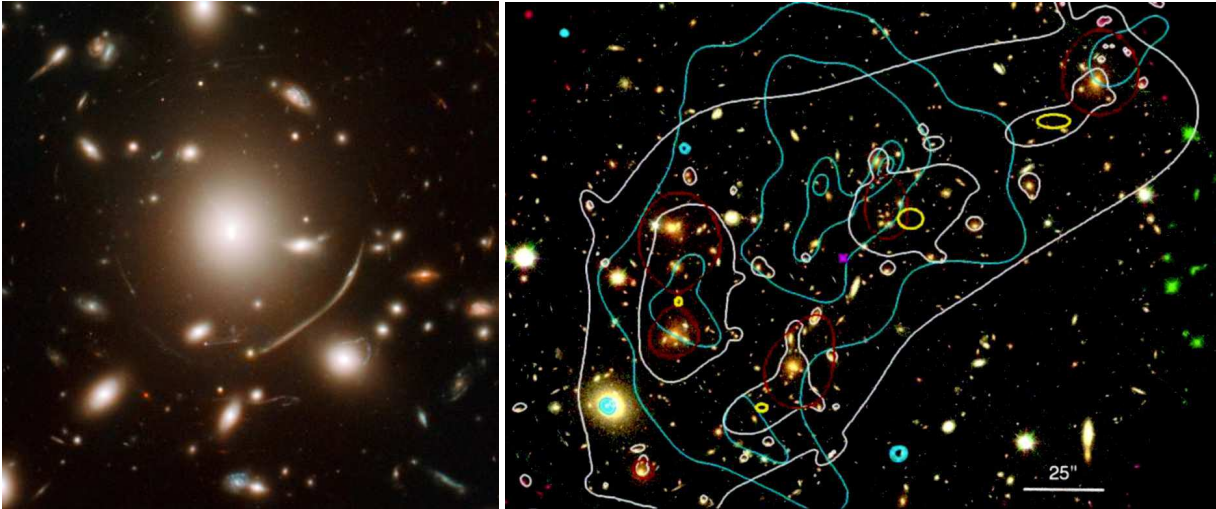


FIGURE 1.8 – Exemples de nouvelles observations d’amas lentilles : à gauche, Abell 383, un des amas du programme CLASH possédant un arc géant à  $z = 1$  et plusieurs systèmes multiples (Richard et al., 2011b). A droite : MACS0717, un des 12 amas MACS situés à  $z > 0.5$ , et qui possède une structure complexe entre les pics de lumière (contours rouges), le gaz X (contours bleus) et la carte de masse reconstruite par identification des systèmes multiples (en blanc, d’après Limousin et al. 2011).

nombre d’images multiples et étudier ces amas avec précision, de la même manière que les exemples présentés en Section 1.2 (Fig. 1.8, à gauche)

- Amas MACS distants : nous avons commencé à travailler sur l’échantillon de 12 amas MACS situés à grand décalage spectral ( $> 0.5$ ). Ces amas sont extrêmement lumineux en X, et donc très massifs (Limousin et al., 2011) et présentent tous un grand nombre d’images multiples. Le travail systématique de modélisation permettra ainsi de confirmer les tendances identifiées entre les échantillons à  $z = 0.2$  et  $z = 0.4$  (Fig. 1.8, à droite)
- Amas non sélectionnés en X : de nouveaux programmes ont identifiés des amas massifs par leur concentration de galaxies en lumière visible (notamment le sondage SDSS qui couvre une grande partie de l’hémisphère céleste nord), ou en utilisant la technique de la *séquence rouge* (sondage RCS, pour Red Cluster Sequence). Ces amas permettent d’élargir notre échantillon en limitant les biais observationnels liés à la sélection dans le domaine X.
- Amas sélectionnés par effet Sunayev-Zeldovich (SZ) : le gaz chaud des amas forme une empreinte sur le fond diffus cosmologique que l’on peut identifier par effet SZ. Celui-ci a pour caractéristique d’être moins dépendant que les autres techniques vis à vis de la distance des amas. Les premières observations par le satellite Planck sont prometteuses pour utiliser cette technique de manière systématique afin d’identifier des amas distants.

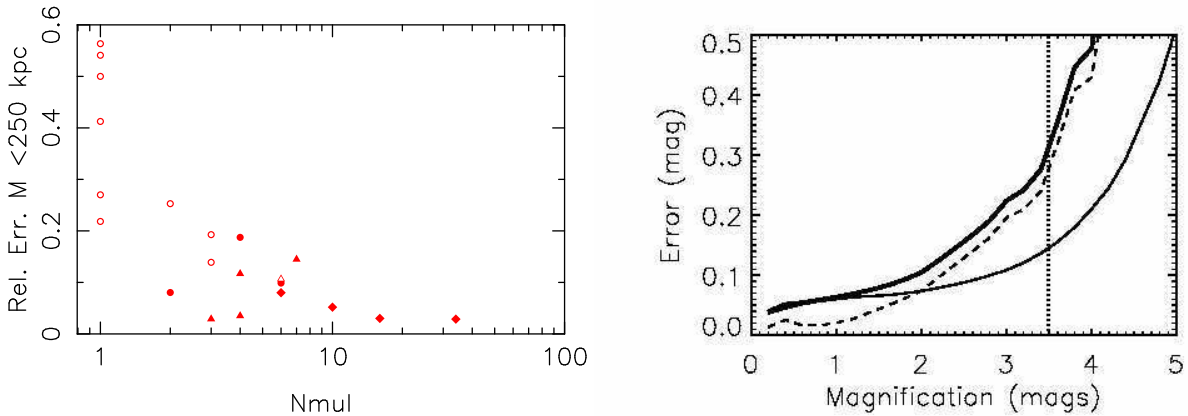


FIGURE 1.9 – A gauche : estimation de l’erreur sur la masse reconstruire pour les amas de l’échantillon LoCuSS, en fonction du nombre d’images multiples utilisée pour la mesure de l’effet de lentille. Les mesures avec les instruments WFPC2 et ACS sont représentées par des symboles ouverts et remplis, respectivement. Cette erreur *statistique* diminue largement pour des amas comme Abell 1689 ( $> 30$  systèmes). A droite : estimation des erreurs statistiques (courbe en trait fin) et systématiques (courbe pointillée) sur l’amplification, obtenue en comparant les résultats de deux paramétrisations. Les erreurs systématiques dominent le budget total (courbe en trait épais) aux plus fortes amplifications ( $> 2$  mags).

A plus long terme ( $\sim 2019$ ) le télescope EUCLID de l’Agence Spatiale Européenne effectuera un sondage d’une superficie de 15000 degrés carrés avec une résolution spatiale de  $0.2''$  et une profondeur de 24.5 AB. On s’attend ainsi à découvrir plusieurs milliers d’amas contenant des grands arcs, y compris une centaines de nouveaux amas massifs (similaires aux amas MACS).

Concernant la précision des modèles de masses reconstruits, l’augmentation du nombre d’images multiples entraîne une diminution directe des erreurs *statistiques* sur la mesure de la masse au coeur d’un amas donné, comme nous avons pu le constater sur l’échantillon LoCuSS (Fig. 1.9, à gauche). Il est plus difficile d’estimer les erreurs *systématiques*, en particulier celles liées aux hypothèses adoptées pour la paramétrisation du modèle (Fig. 1.9, à droite). La généralisation de l’usage des modèles à grille (Jullo et al. 2010), méthode hybride entre les modèles actuels et des modèles non-paramétriques, permettra certainement de mieux maîtriser le budget d’erreur global.

# Chapitre 2

## Propriétés résolues des Galaxies Distantes

### 2.1 Contexte

La période correspondant aux décalages spectraux  $1 < z < 5$  est très importante pour la formation et l'évolution des galaxies. En effet, durant cette époque, la plupart des galaxies ont accumulé l'essentiel de leur masse stellaire en formant abondamment des étoiles. Les processus de formation stellaire en jeu sont certainement différents pour ces objets par rapport aux galaxies de l'Univers local, et pour pouvoir les étudier il faut avoir accès à leurs propriétés *internes* et *structurelles* : leur morphologie, leur cinématique, la répartition de leurs éléments chimiques.

L'avènement des spectro-imageurs dans le proche infrarouge (Integral Field Units, ou IFUs) sur les plus grands télescopes comme le Keck, le VLT ou Gemini a certainement révolutionné ce domaine de l'étude des galaxies distantes. En effet, en produisant des spectres pour chaque région résolue d'une galaxie, ces instruments nous permettent de cartographier systématiquement l'ensemble de l'objet. Les premières études se sont concentrées sur les propriétés dynamiques des galaxies (Genzel et al. 2006, 2008; Förster Schreiber et al. 2006, 2009; Law et al. 2007, 2009), en particulier les plus lumineuses et les plus massives ( $> 10^{11} M_{\odot}$ ) qui sont celles actuellement les mieux résolues. En effet, même en utilisant *l'optique adaptative* par étoile naturelle ou étoile laser, on ne peut atteindre que des résolutions spatiales de l'ordre de  $0.1 - 0.2''$ , qui correspondent à une distance physique de 1 kpc à  $z = 3$ . Seules des galaxies aussi massives (et donc aussi grandes) offrent suffisamment d'éléments de résolution pour étudier leur dynamique, tandis que la majorité des galaxies distantes ont une taille typique de 3-5 kpc ce qui limite l'interprétation de la spectroscopie résolue.

Après les premiers résultats sur les propriétés cinématiques des galaxies distantes, les études utilisant les IFUs se sont par la suite tournées vers les abondances chimiques. La combinaison de plusieurs raies d'émission du gaz nous renseigne en effet sur la métallicité de ces objets. Cresci et al. (2010) ont utilisé les raies de l'hydrogène et d'oxygène pour mesurer le gradient de métallicité, entre le centre et la périphérie, de 3 galaxies très

lumineuses. Ils ont déterminé que ces galaxies possédaient un gradient positif (déplétion de métaux en leur centre). Cet effet résulterait de l'accrétion de gaz primordial (de faible métallicité) au centre des galaxies massives distantes.

D'un autre côté, Queyrel et al. (2012) ont pu mesurer le gradient de métallicité d'un échantillon de 26 galaxies massives (typiquement  $10^{10} M_{\odot}$ ) à  $z \sim 1.2$  avec SINFONI, et ont mesuré des gradients positifs similaires à ceux de Cresci et al. (2010) dans  $\sim 25\%$  des cas. Il semblerait donc que dans le cas des galaxies massives, la fréquence de tels gradients positifs augmente avec le redshift, ceux-ci n'étant pas observés dans l'Univers local. La plupart des galaxies proches montrent un gradient négatif avec une pente typique  $\Delta Z \sim -0.1 \text{ dex.kpc}^{-1}$ .

La combinaison d'un IFU, de l'optique adaptative, et de l'amplification gravitationnelle permet de repousser les limites de résolution des télescopes actuels. En effet, l'amplification par une galaxie ou un amas massif provoque une augmentation de la surface apparente d'une source distante (par le facteur d'amplification  $\mu$ ), avec un étirement plus important dans une direction privilégiée (direction de cisaillement). Ainsi, même si l'étirement moyen est  $\sim \sqrt{\mu}$  il peut atteindre des facteurs 10-20 dans la direction de cisaillement. L'effet global est une augmentation de la résolution spatiale de manière anisotropique, qui permet de repousser les limites jusqu'à 100-200  $\mu\text{m}$ . Ces dimensions correspondent à la taille typique des grandes régions HII de formation stellaire dans l'Univers local.

Jusqu'en 2007, le nombre d'arcs gravitationnels brillants (magnitude totale  $< 22$  AB) et bien résolus spatialement était encore limité à  $z < 1$ . Le développement des grands sondages de lentilles gravitationnelles, comme le Sloan Digital Sky Survey (SDSS) ou MACS (amas de galaxies, voir le chapitre 1) a vu la multiplication d'arcs gravitationnels brillants à grande distance (Figure 2.1) : "l'œil cosmique" (Cosmic Eye, Smail et al. 2007), l'arc "8 heures" (8 o'clock, Allam et al. 2007), le "fer à cheval cosmique" (Belokurov et al., 2007), le "clône" (Lin et al., 2009) etc... Ces arcs ont la particularité d'avoir une amplification totale  $\mu > 10$ , une taille apparente de 5-10" dans la direction de cisaillement, et une magnitude totale  $< 21$  AB. Ce sont donc des cibles privilégiées pour nos études IFU d'arcs amplifiés.

## 2.2 Spectroscopie 3D d'arcs gravitationnels

### 2.2.1 Procédure utilisée

Avec Daniel Stark et Tucker Jones, étudiants en thèse à Caltech sous la direction de Richard Ellis, j'ai collaboré à un programme utilisant le spectrographe IFU OSIRIS au Keck pour effectuer le suivi des sources issues de mes programmes de spectroscopie d'images multiples dans les amas lentilles MACS et LoCuSS (chapitre 1) ou bien provenant de la littérature. Ce projet s'est déroulé en suivant plusieurs étapes successives :



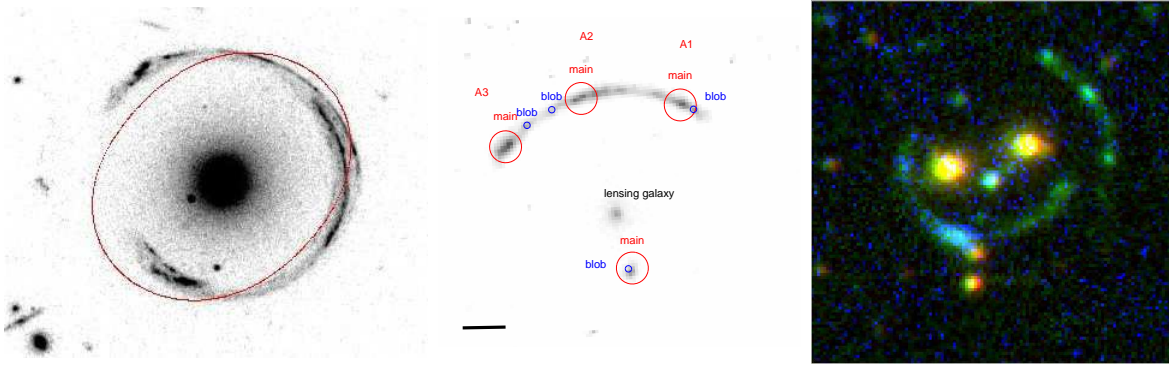


FIGURE 2.1 – Nouveaux exemples de galaxies distantes brillantes et bien résolues : de gauche à droite le ‘fer à cheval’ , l’arc “8 heures”, et le chat du Cheshire.

1. Construction de l'échantillon d'arcs pour le suivi IFU. Ceux-ci doivent être suffisamment brillants et étendus pour profiter au maximum de l'effet de lentille, très amplifiés (généralement  $\mu > 10$ ) et avoir un décalage spectral tel que les raies d'émission du gaz ne soient pas trop contaminées par les raies du ciel. Par ailleurs, il est nécessaire pour l'utilisation de l'optique adaptative d'avoir une étoile de référence brillante (*tip-tilt star*) à proximité. Enfin, un modèle de lentille doit être disponible pour effectuer la reconstruction précise de ces sources.
2. Pour tous ces premiers candidats, un spectre proche-infrarouge rapide ( $< 15$  minutes de temps de pose) est obtenu avec les instruments NIRSPEC et ISAAC utilisant une fente longue. Celui-ci permet de confirmer le décalage spectral et d'évaluer la brillance (intégrée et surfacique) des raies d'émission du gaz. Ces spectres nous ont également été utiles par la suite pour étudier les propriétés intégrées des objets (voir chapitre 3).
3. La raie la plus brillante des meilleurs candidats (généralement  $[OIII]$  ou  $H\alpha$ ) est observée avec OSIRIS et ses propriétés résolues (flux, vitesse, dispersion) sont analysées.

Les résultats obtenus concernent la cinématique et la répartition des abondances chimiques dans des galaxies distantes, et sont détaillés dans les sections suivantes.

### 2.2.2 Dynamique du gaz

*Stark et al. 2008 Cosmic Eye Nature*

*Jones et al. 2010a Sample of 6 with IFU*

La source la plus brillante de notre échantillon, surnommée l'œil cosmique (*Cosmic Eye*), se trouve à  $z = 3.07$ . Elle est formée d'un anneau d'Einstein allongé (dû à la superposition d'une galaxie lentille distante et d'un l'amas de galaxies massif) lui donnant une forme caractéristique d'œil (Figure 2.2, à gauche) sur des images à haute résolution du télescope spatial. J'ai obtenu un programme spécifique sur Hubble pour compléter l'image ACS existante par des observations dans 3 autres filtres, du visible au proche-infrarouge.

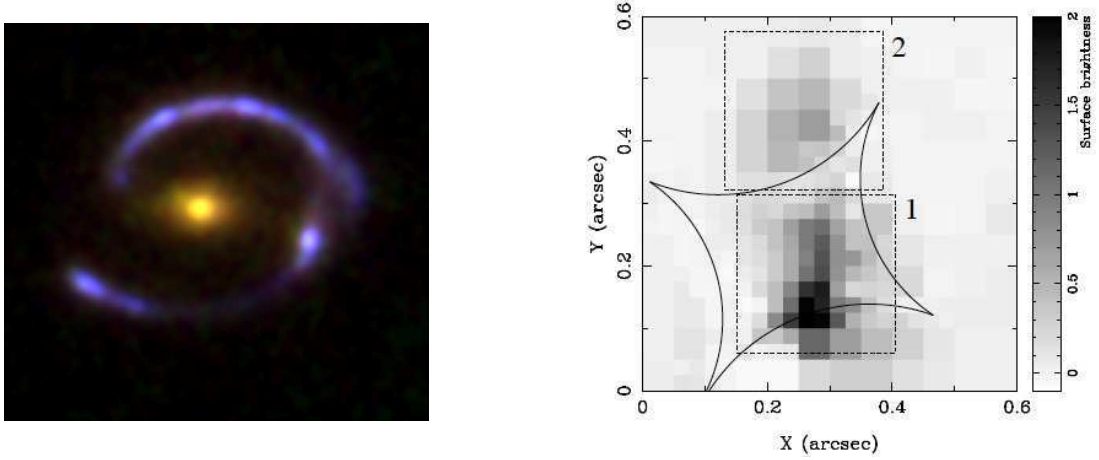


FIGURE 2.2 – À gauche, image à haute résolution de l’œil cosmique obtenue par le télescope Hubble en combinant les filtres visible (caméras ACS et WFPC2) et proche-infrarouge (caméra NICMOS). À droite, reconstruction de la source d’origine en corrigeant de l’effet de lentille (Dye et al., 2007) : on distingue deux composantes (marquées par 1 et 2) avec une amplification différente.

L’image couleur montre ainsi que ” l’œil ” est en réalité formé de deux composantes distinctes, qui sont clairement identifiées dans la reconstruction de la galaxie dans le plan source (Figure 2.2, à droite), effectuée par Dye et al. (2007). La galaxie source s’étend sur  $\sim 1$  kpc, et par conséquent ne serait pas résolue sans amplification gravitationnelle.

Les observations OSIRIS ont été obtenues en 2007 et couvrent les raies  $H\beta$  de l’hydrogène et  $[OIII]$  de l’oxygène (Stark et al., 2008). Il est possible de relier le flux observé de  $H\beta$  avec le taux de formation stellaire, tandis que la raie de  $[OIII]$  plus brillante est utilisée pour étudier la cinématique de l’objet. Les résultats obtenus en ajustant le profil des raies du gaz à différentes positions de l’objet sont résumés dans la Figure 2.3. L’analyse du champ de vitesse, projeté le long de l’axe principal de la source, montre clairement un profil typique d’une source en rotation, avec une vitesse circulaire de  $\sim 65$  km/s après correction de l’effet d’inclinaison. Par ailleurs, un deuxième résultat de notre analyse est que la composante secondaire, identifiée sur les images Hubble, partage la même distribution en vitesse que la composante principale de l’objet, mais forme des étoiles plus abondamment que celle-ci. Il s’agit donc bien d’un système unique plutôt que de la fusion de deux objets.

Ces observations de l’œil cosmique, amplifié d’un facteur  $28 \pm 3$ , ont constitué une avancée considérable dans l’étude des galaxies distantes, avec l’analyse d’une galaxie typique à  $z = 3$  à une résolution de  $\sim 150$  parsec. Notre meilleure interprétation de cette source c’est qu’il s’agirait d’un disque en formation, qui montre encore des signes de fortes turbulence et dans lequel une région périphérique (la composante secondaire) forme des étoiles par fragmentation du gaz mais dont le champ de vitesse global se rapproche d’un système en rotation.



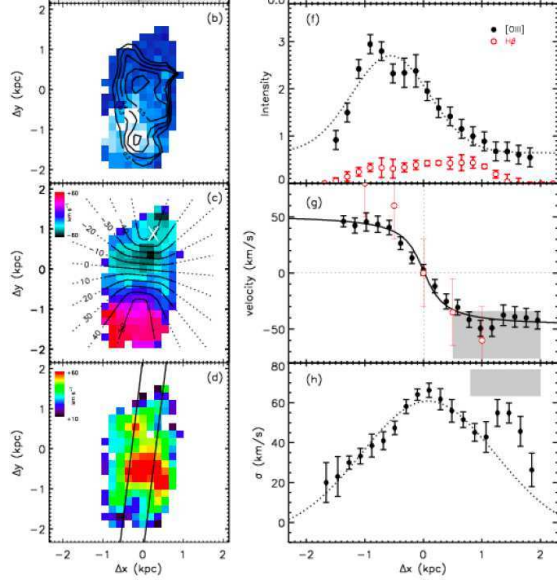


FIGURE 2.3 – Résultat des observations OSIRIS de l’œil cosmique (Stark et al., 2008). De haut en bas : images 2D et projection le long de l’axe principal de l’objet du flux des raies ( $[OIII]$  et  $H\beta$ ), du champ de vitesse et de sa dispersion. Les deux composantes de l’œil semblent partager la même cinématique, avec un profil de vitesse caractéristique d’un système en rotation et une dispersion de vitesse maximale au centrale.

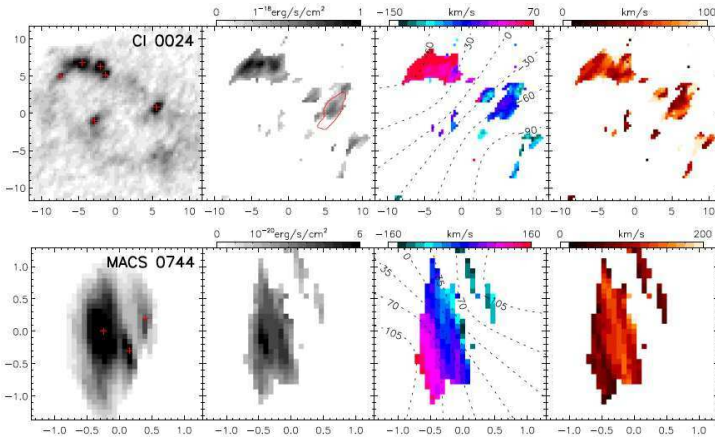


FIGURE 2.4 – Exemples de sources reconstruites et des cinématiques observées pour 2 galaxies de Jones et al. (2010b). De gauche à droite : image Hubble à haute résolution et régions HII identifiées (croix rouges), flux  $H\alpha$ , cinématique et dispersion de vitesse. On voit clairement un gradient de vitesse dans les deux cas (lignes pointillées).

Forts de ce succès, nous avons par la suite construit un échantillon plus important de 6 objets (y compris l’œil cosmique) situés à  $z = 2 - 3$  et pour lesquels les observations OSIRIS ont montré une forte détection de la raie  $H\alpha$  ou  $[OIII]$  (Jones et al., 2010b). Parmi les champs de vitesse reconstruits (Figure 2.4), un seul système montrait des signes de fusion entre deux galaxies, les autres étant clairement interprétés par la rotation d’un disque incliné. Ce résultat semble indiquer qu’avec une résolution suffisante, les galaxies distantes typiques (avec une masse stellaire de quelques  $10^9 M_\odot$ ) montrent généralement une rotation. Bien entendu, il est difficile de déterminer des propriétés générales compte tenu de la petite taille de cet échantillon et des effets de sélection mentionnés en section 2.2.1.

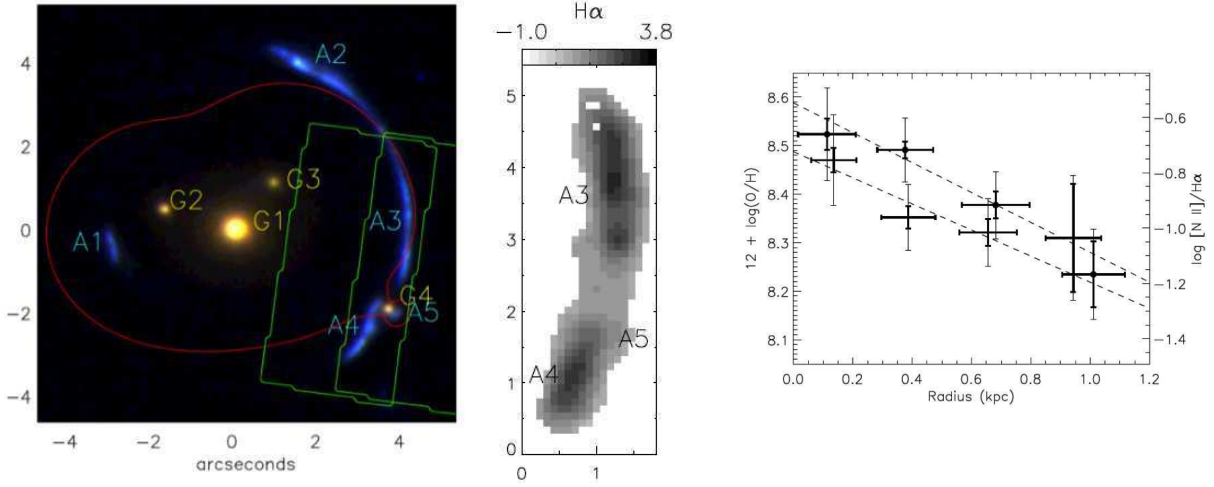


FIGURE 2.5 – A gauche : observations de l’arc ‘clône’ par OSIRIS (champ de vue marqué en vert et ligne critique en rouge). A droite : gradient de métallicité observé au travers des raies  $H\alpha$  et  $[NII]$ , le long de l’arc.

### 2.2.3 Gradients de métallicité

*Jones et al. 2010b*

*Yuan et al. 2011*

La mesure de la *métallicité* du gaz est un paramètre clé pour comprendre les mécanismes de rétro-action (*feedback*) liés à la formation stellaire. Une signature directe de ces phénomènes est la présence d’un *gradient* de métallicité, qui peut être directement comparé avec les prédictions des modèles de formation stellaire et d’assemblage des galaxies. La galaxie SDSSJ120602.09+51422, découverte par le sondage SDSS et surnommée le ‘clône’ (Lin et al., 2009) se situe à un décalage spectral  $z = 2.001$  tel que les deux raies proches  $H\alpha$  et  $[NII]$ , respectivement de l’hydrogène et de l’azote, se situent dans une région convenable du proche-infrarouge pour la spectroscopie IFU. Nous avons observé cet arc en 2010 avec OSIRIS (Jones et al., 2010a). Avec une amplification  $\mu \sim 30$  et un taux de formation d’étoiles intrinsèques de  $50 M_{\odot}/\text{an}$ , les raies d’émission de ce grand arc sont exceptionnellement brillantes (Figure 2.5).

La distribution du flux des raies d’émission détectées le long de l’arc montre clairement une différence entre l’azote et l’hydrogène, les deux étant anti-corrélés. La reconstruction dans le plan source par notre modèle de lentille montre que le rapport  $[NII]/H\alpha$ , qui est proportionnel à l’abondance en azote et donc à la métallicité du gaz dans la galaxie, possède un pic vers le centre de l’objet et décroît en périphérie. Ce gradient de métallicité, de l’ordre de  $-0.27 \pm 0.11$  dex/kpc, est très prononcé, ce qui suggère un mécanisme de formation de l’intérieur vers l’extérieur de l’objet.

Une des difficultés de l’arc ‘clône’ est l’interprétation de la source due à son étirement important le long d’un axe (cisaillement), et l’absence d’un champ de vitesse significatif le long de cette direction. Pour ces raisons, nous avons cherché à résoudre la métallicité pour

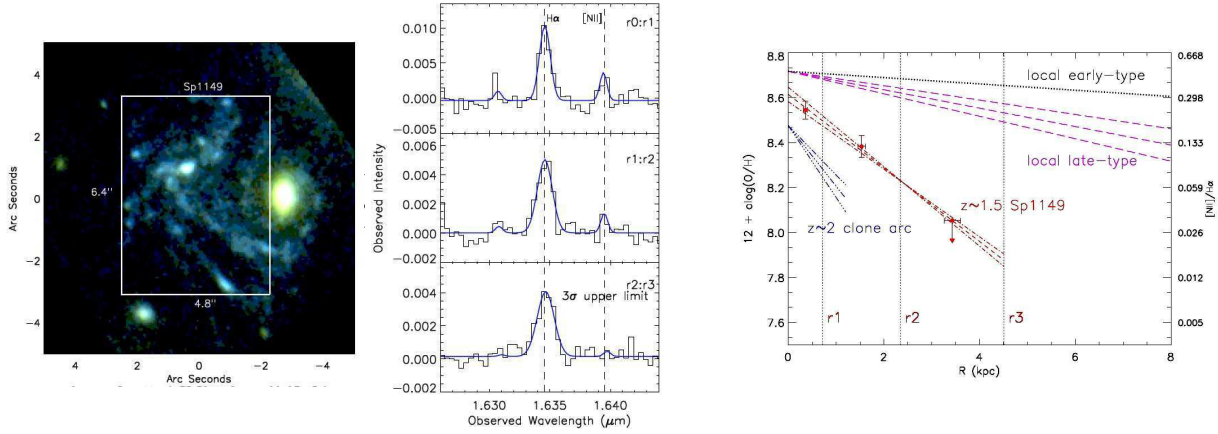


FIGURE 2.6 – Observations de la galaxie Sp1149, spirale vue de face à  $z = 1.5$  très fortement amplifiée par l’amas MACS1149. Un gradient de métallicité négatif est clairement détecté entre le centre de la galaxie (région la plus brillante à gauche) et les bras spiraux, et sa valeur est plus intense que des galaxies de l’Univers local, même si elle est moins forte que dans le cas du clône.

un autre objet, amplifié par l’amas de galaxies MACS1149. Cette source, bien que située à un décalage spectral plus faible ( $z = 1.49$ ), est un système multiple dont chacune des images montre clairement la morphologie d’une galaxie spirale vue de face (Figure 2.6). Ceci est dû à une amplification quasi- isotropique de ces images, qui atteint un facteur 25 (d’après le modèle que nous avons publié dans Smith et al. 2009).

Les données IFU prises en 2010 couvrent l’ensemble de la galaxie, et permettent d’isoler trois zones annulaires dans lesquelles le spectre peut être intégré à rapport signal-sur-bruit constant. Les mesures correspondantes du rapport de raies  $[NII]/H\alpha$  (que l’on peut associer à la métallicité) montrent, là encore, un gradient négatif entre le centre de la galaxie et les bras spiraux, bien que moins prononcé que pour le ‘clône’ (Yuan et al. 2011, Figure 2.6 à droite). Un tel gradient de métallicité est compatible avec un modèle de formation de disque depuis l’intérieur vers l’extérieur (voir par exemple Benson 2010), mais semble en contradiction avec le scénario proposé par Cresci et al. (2010). Cette différence pourrait provenir de la masse stellaire des galaxies lentillées, typiquement plus faible (de l’ordre de  $10^9 M_{\odot}$ ) que dans le cas des galaxies massives montrant un gradient positif. Il faut également souligner que la taille des échantillons disponibles pour une telle comparaison reste limitée. Néanmoins, la technique utilisée pour le ‘clône’ et Sp1149 est prometteuse pour être étendue à un plus grand nombre de galaxies.

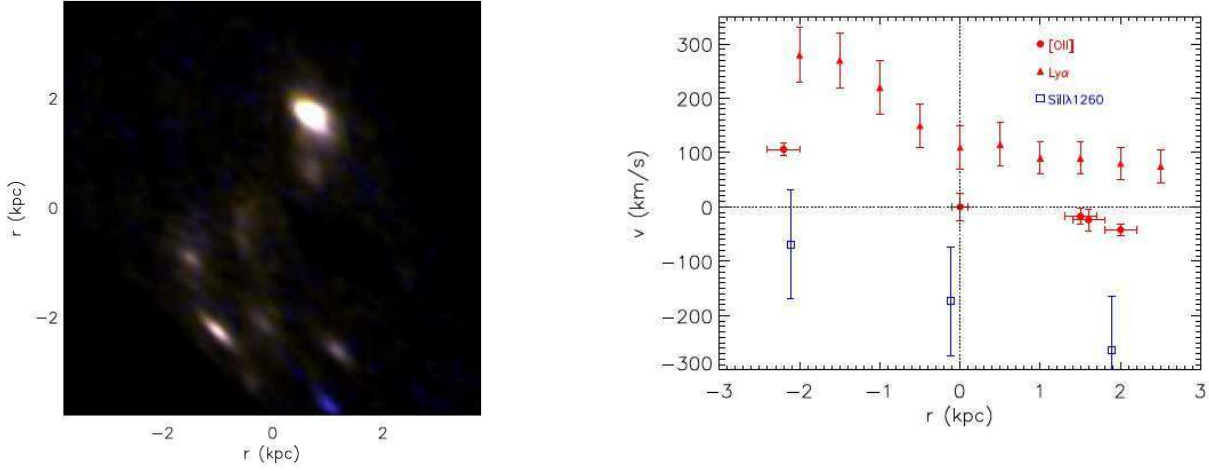


FIGURE 2.7 – A gauche : reconstruction de l’arc géant à  $z = 4.9$  amplifié par l’amas MS1358+62 (Swinbank et al., 2009). La source se présente sous la forme de multiples régions de formation stellaire très brillantes et mesurant un diamètre typique de  $\sim 300$ -500 pc. A droite : mesure du champ de vitesse sur cette galaxie à partir de l’émission Lyman- $\alpha$ , des absorptions UV, ou de la raie [OII]. Ces 3 mesures de cinématiques sont compatibles avec un décalage en vitesse de l’ordre de 100-200 km/s qui correspond à un phénomène d’*outflow*.

## 2.3 Paramètres physiques des régions de formation stellaire

*Swinbank et al. (2009)*

*Jones et al. (2010b)*

*Livermore et al. 2012, à soumettre*

En collaboration avec Mark Swinbank et d’autres chercheurs de Durham, j’ai participé à l’étude d’un arc géant à  $z = 5$  dans des données IFU obtenues avec l’instrument NIFS sur Gemini. Cet arc, découvert par Franx et al. (1997) au cœur de l’amas MS1358+62, est exceptionnel : avec une magnitude totale de  $\sim 22$  AB en bande I, c’est une des sources les plus brillantes (après amplification) connue à ce redshift, et la mieux résolue. Les images du télescope spatial montrent une morphologie très particulière : cette galaxie est en effet composée d’un grand nombre de régions de formation stellaire (ou régions HII), sans organisation apparente (disque, symétrie) même après reconstruction dans le plan source (Figure 2.7 à gauche).

Les régions HII les plus brillantes sont clairement détectées dans les données via la raie d’oxygène [OII] (la mieux détectable à ce redshift) qui trace la formation stellaire. De plus, malgré la morphologie irrégulière du continuum UV sondé par les images Hubble, ces régions montrent un champ de vitesse ordonné compatible avec celui de la raie Lyman- $\alpha$  (Figure 2.7 à droite).

Nous avons par ailleurs étudié la morphologie de ces régions de formation stellaire,

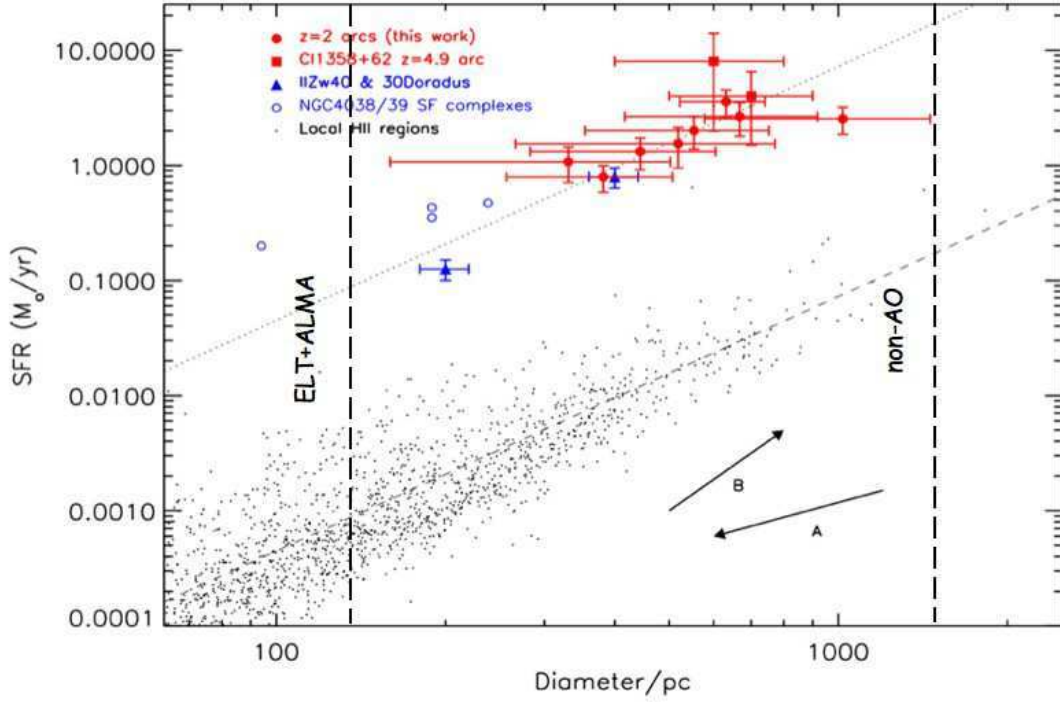


FIGURE 2.8 – Localisation des régions de formation stellaire extraites des sources de Swinbank et al. (2009) et Jones et al. (2010b) dans un diagramme SFR-taille. Les régions HII des galaxies de l’Univers local forment une population bien définie suivant une relation  $\text{SFR} \propto r^2$ , tandis que les régions identifiées à grand décalage spectral sont, typiquement, un facteur 100 plus lumineuse pour la même taille (symboles rouges). Une telle intensité est comparable aux galaxies à sursauts de formation stellaire de l’Univers local (symboles bleus).

une fois corrigées de l’amplification. Certaines de ces régions sont à peine résolues par Hubble, même à une limite intrinsèque de  $\sim 100$  parsecs. En combinant ces dimensions avec les mesures du taux de formation stellaire (SFR) par NIFS, les régions HII de l’arc sont très compactes et se situent dans une zone du diagramme SFR-taille très différente des régions HII identifiées dans l’Univers local (Figure 2.8). Cette différence significative ne semble pas être due à un effet de sensibilité ou de résolution. Elle pourrait correspondre à un différent *mode* de formation stellaire : les galaxies distantes, plus riches en gaz, formeraient leurs étoiles dans des conditions physiques très différentes de celles de l’Univers local : en particulier la pression et la densité du gaz plus élevées rendraient les régions HII plus compactes.

Au vu de ce résultat, nous avons étudié les régions de formation stellaire dans l’échantillon de Jones et al. (2010b) à  $z = 2 - 3$ . Pour ces six objets, nous avons identifié les pics d’émission  $\text{H}\alpha$  et mesuré le flux dans des isophotes. Le résultat obtenu, moins précis que pour l’arc de MS1358, a néanmoins confirmé la tendance observée (Figure 2.8).

La question qui s’est alors posée était de savoir si la différence observée correspondait



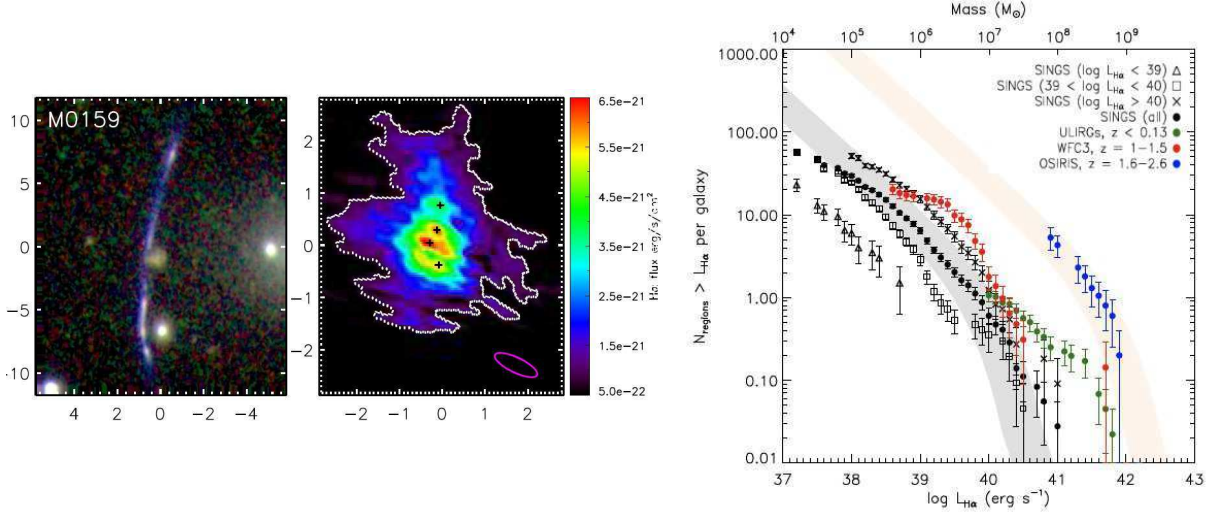


FIGURE 2.9 – A gauche : exemple d’arc à  $z = 1$  observé par Hubble dans un filtre en bande étroite, et la reconstruction dans le plan source de l’excès de flux de le filtre en bande étroite correspondant à l’émission  $\text{H}\alpha$ , avec la détection de plusieurs régions de formation stellaire. A droite : fonction de luminosité des régions de formation stellaire identifiées pour cet échantillon, celui de Jones et al. (2010b) et d’autres échantillons locaux ou distants. Les résultats sont comparables aux modèles de Hopkins et al. (2011) concernant la distribution de nuages moléculaires géants dans l’Univers local (en gris) et à grand décalage spectral (en rose).

à une *bimodalité*, avec deux modes de formation stellaire distincts entre l’Univers local et les galaxies distantes, ou alors un *continuum*, avec une tendance progressive à observer des régions compactes à grand décalage spectral. De plus, les résultats obtenus étaient limités par des biais observationnels sur les régions HII, à la fois en taille et en brillance de surface. Nous avons eu l’idée d’utiliser la nouvelle caméra WFC3 sur le télescope Hubble afin d’étudier des régions HII à  $z = 1$ , et ainsi construire un échantillon à une distance intermédiaire entre l’Univers local et les galaxies distantes. En effet, cet instrument possède plusieurs filtres en *bande étroite*, couvrant parfaitement la raie  $\text{H}\alpha$  pour des galaxies autour de  $z = 1$  ou de  $z = 1.5$ . Grâce aux grands relevés spectroscopiques des amas de galaxies MACS et LoCuSS, nous avons construit un échantillon de 8 galaxies (Figure 2.9) cartographiée dans la raie  $\text{H}\alpha$  avec de très bonnes performances : limite en résolution spatiale de 80 pc et en flux de  $0.01 M_{\odot}/\text{an}$  par région HII. Ces données ont été analysées par Rachael Livermore, dans le cadre de sa thèse à Durham.

Les mesures obtenues montrent que les régions de formation stellaire de l'échantillon à  $z = 1 - 1.5$  se situent dans une région similaire aux galaxies proches dans un diagramme taille-SFR. L'écart avec la relation observée à grand redshift par Jones et al. (2010b) proviendrait d'une différence dans les propriétés globales des galaxies, les galaxies distantes ayant une brillance de surface plus élevée (en SFR) que les galaxies proches. Un autre résultat important concerne la *fonction de luminosité* des régions HII (Figure 2.9 à droite) : celle-ci montre une évolution avec le redshift avec la présence d'une coupure aux fortes luminosités. Cette coupure s'explique par un modèle simple dans lequel les galaxies distantes ont une plus grande densité de surface de gaz, permettant la formation de clumps massifs. Cette évolution est compatible avec les prédictions des modèles de Hopkins et al. (2011).

## 2.4 Perspectives

Les deux mesures de gradients de métallicité dans le 'clône' et la galaxie spirale de MACS1149 semblent, à première vue, en opposition directe avec les résultats de Cresci et al. Néanmoins, ceux-ci ont étudié des galaxies beaucoup plus massives et un peu plus distantes ( $z \sim 3$ ), à un décalage spectral où les raies  $H\alpha$  et  $[NII]$  ne sont pas détectables avec les IFUs actuels. Or, ces raies sont les plus robustes pour estimer la métallicité du gaz, car leur proximité rend leur rapport de flux indépendant des effets du rougissement.

Nous poursuivons actuellement notre travail de spectroscopie résolue sur un échantillon de 7 objets à  $z \sim 1$ , pour lesquels les raies de  $H\alpha$  et  $[NII]$  sont observables dans la bande J du proche infrarouge, une zone du spectre où la contamination par les raies du ciel n'est pas trop importante. Nous utilisons pour cela le spectrographe SINONI sur le VLT, un IFU avec une taille de champ de  $8 \times 8$  arcsec et des pixels de  $0.25''$  bien adaptés à nos objets étendus. Les premières analyses de cet échantillon montrent une détection claire du champ de vitesse (Figure 2.10) sur plusieurs objets.

Par la suite, MUSE et KMOS, deux IFUs de seconde génération sur le VLT, offriront dès 2013 de bien meilleures performances pour continuer ces études. Le champ de vue de MUSE ( $1 \times 1$  arcmin<sup>2</sup>) couvre parfaitement la région au cœur d'un amas lentille où se produisent les images multiples (Figure 2.11, à gauche), et fournira ainsi de l'information spectrale résolue pour tous les émetteurs  $[OII]$  à  $z < 1.5$  et Lyman- $\alpha$  à  $2.8 < z < 6.7$  amplifiés par cet amas. La capacité de multiplexage de KMOS, quant à elle, nous permettra d'étudier en un seul pointé plusieurs dizaines de galaxies amplifiées à  $0.8 < z < 5$  dans le proche infrarouge (Figure 2.11, à droite).

Cet afflux de données spectrales résolues va nécessiter le développement de nouvelles techniques d'analyse permettant de reconstruire les propriétés intrinsèques des sources. Nous mettons actuellement en place, en collaboration avec Eric Jullo et Jean-Paul Kneib à Marseille, des améliorations basées sur le logiciel Lenstool pour intégrer la morphologie des sources comme paramètres supplémentaires lors de l'optimisation d'un modèle d'amas. L'intérêt principal de cette reconstruction directe de la source est la prise en compte complète de chacune des images d'un système multiple, les différences de cisaillement et

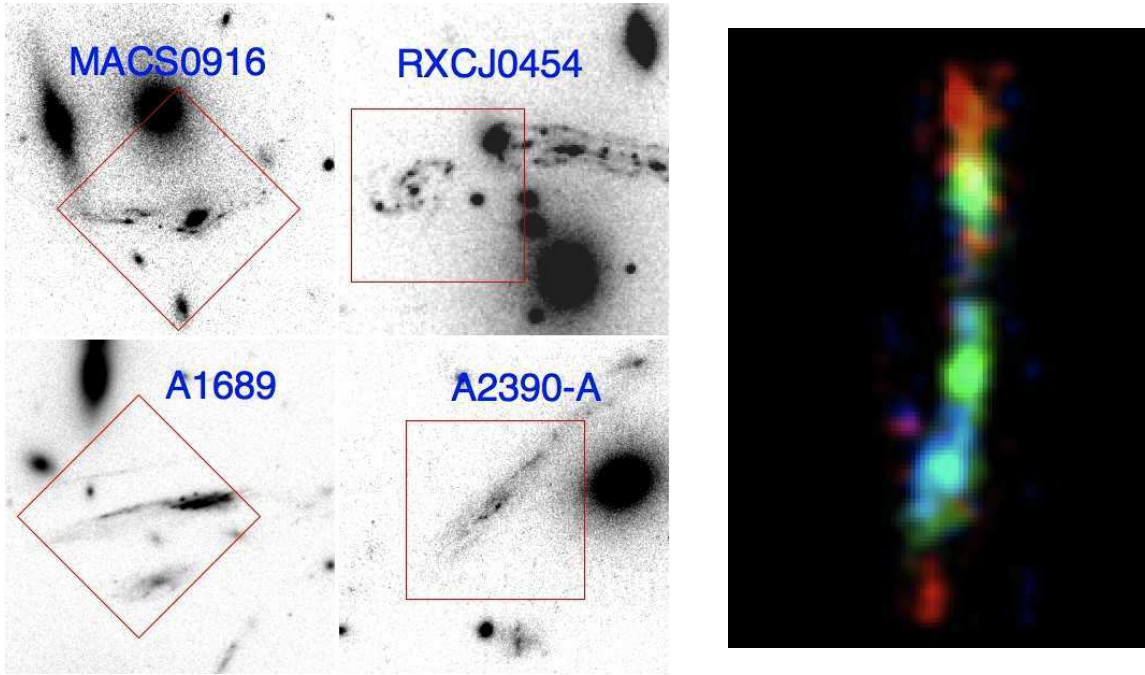


FIGURE 2.10 – A gauche : 4 galaxies à  $z = 1 - 1.5$  de l'échantillon étudié avec SINFONI. A droite : résultats préliminaires obtenues sur un grand arc de l'échantillon, montrant le champ de vitesse  $H\alpha$  clairement détecté avec la symétrie due aux images multiples (alternance rouge-vert-bleu-vert-rouge).

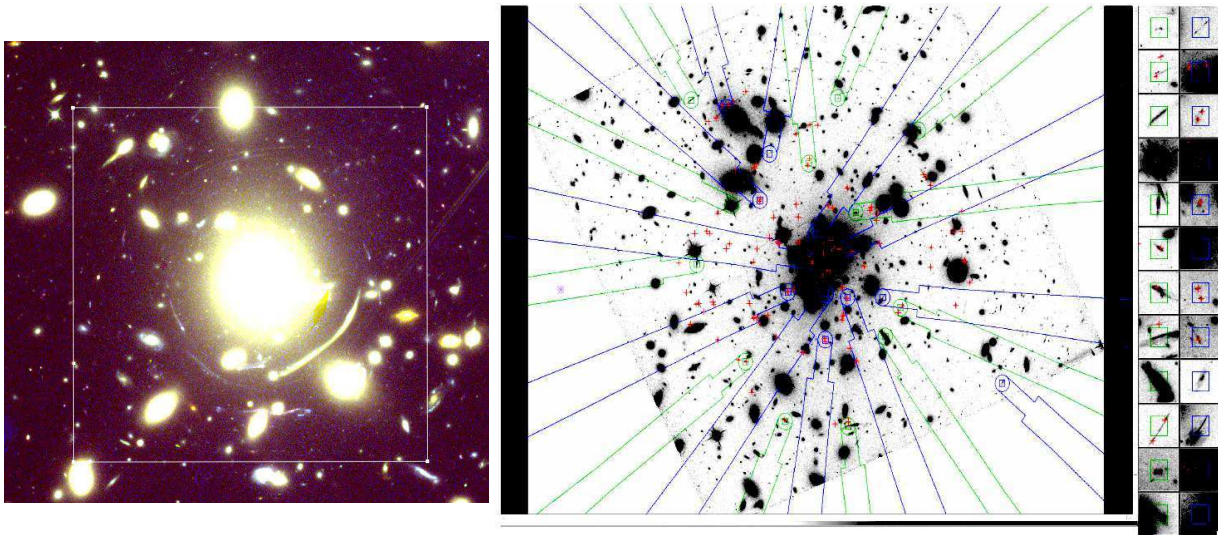


FIGURE 2.11 – A gauche : comparaison entre le champ de vue de MUSE ( $1 \text{ arcmin}^2$ , rectangle blanc) et un des amas du programme CLASH. MUSE couvrira parfaitement la région centrale contenant un grand nombre d'arcs, d'images multiples, et de galaxies d'amas. A droite : exemple d'observation KMOS pour le suivi de multiples sources d'arrière plan dans Abell 1689 par des IFUs. Les arcs les moins brillants ont une taille typique de  $1\text{-}2''$  de long, bien adaptée au champ de vue des IFUs.



de la réponse instrumentale. A terme, nous souhaitons arriver à modéliser directement le champ de vitesse d'une source observée avec un IFU à partir de l'ensemble des pixels contenu dans le cube de données.



# Chapitre 3

## Propriétés intégrées des Galaxies Distantes

### 3.1 Contexte

Les propriétés structurelles internes des galaxies distantes, telles que nous les avons détaillées au chapitre 2, ne sont généralement disponibles que sur des échantillons restreints (galaxies très massives ou amplifiées), de l'ordre de la dizaine d'objets. A cause de leur distance, mais aussi de leurs plus petites dimensions propres, la grande majorité des galaxies à  $z > 2$  ne sont pas résolues, ou alors à raison d'une chute importante du rapport signal-sur-bruit par élément de résolution. A cela s'ajoute l'effet du *seeing*, qui limite encore la résolution spatiale atteinte sur la plupart des instruments au sol à des valeurs typiques de 0.5-1.0", et d'avantage sur les instruments opérant aux plus grandes longueur d'onde (exceptés les interféromètres).

Pour ces raisons, les grands échantillons de galaxies distantes sont d'avantage étudiés au travers de leurs propriétés intégrées : photométrie dans différentes bandes permettant de construire la distribution spectrale en énergie (ou SED), spectre total de l'objet et rapports des raies en émission du gaz, ou mesure de leur taille au travers du rayon de demi-lumière sur les images à plus haute résolution spatiale. Les nouveaux observatoires spatiaux *Spitzer* et *Herschel* ont largement contribué à notre compréhension de ces objets, grâce à leur grande sensibilité et la couverture des domaines infrarouge moyen et lointain, qui étaient jusqu'alors très limités. Ils permettent ainsi de couvrir le pic de l'émission stellaire des galaxies distantes, ainsi que l'émission des poussières. On considère plusieurs grandes populations d'objets selon la technique de sélection utilisée pour leur identification : les galaxies Lyman-Break (LBGs), les émetteurs Lyman- $\alpha$  (LAEs), les galaxies rouges distantes (DRGs), et les galaxies sub-millimétriques (SMGs), parmi d'autres. Au total, ces échantillons contiennent plusieurs milliers d'objets.

Les LBGs, sélectionnées principalement dans le visible et le proche-infrarouge grâce à la 'cassure' de Lyman, sont de loin les plus nombreuses et les mieux étudiées par photométrie et spectroscopie. Les travaux du groupe de Steidel et al. (1999, 2003, 2011) ont cherché à caractériser leurs propriétés globales. La fonction de luminosité, mesurant la

répartition des LBGs par intervalle de luminosité, est maintenant bien contrainte, et la technique de sélection appliquée jusqu'à  $z > 7$  (Bouwens et al., 2006, 2008, 2009; Richard et al., 2006, 2008). Peu à peu, les propriétés des LBGs ont été mieux caractérisées avec les mesures spscroscopiques dans l'ultraviolet au repos (Shapley et al., 2003), dans le visible au repos (Pettini et al., 2001; Erb et al., 2003), ou les mesures de la masse stellaire en combinaison avec des observations Spitzer (Reddy et al., 2006; Erb et al., 2006b). Récemment, Law et al. (2012) a utilisé des images à haute résolution du télescope HST pour mesurer la distribution des dimensions physiques des LBGs.

Tous ces résultats ont permis de dégager des *relations d'échelle* dans leurs propriétés globales : relation masse-métallicité Mannucci et al. (2009), relation taille-masse (Law et al., 2012), propriétés de la poussière et du gaz moléculaire (Papovich et al., 2007), et leur évolution par rapport aux relations dans l'Univers local et en fonction du décalage spectral des objets. Malgré tout, les observations d'objets individuels ont encore un rapport signal-sur-bruit limité, notamment pour les plus faibles et les moins massifs ou pour ce qui concerne l'étude du *continuum* spectral (les raies d'émission étant généralement mieux détectées). Une des techniques favorites pour contre-carrer ce problème est celle de l'empilage (*stacking*) qui cherche à moyenner des sous-échantillons partageant les mêmes propriétés (même redshift, même domaine de masse stellaire ou de luminosité).

Là encore, une technique alternative consiste à construire des échantillons d'objets amplifiés par effet de lentille gravitationnelle. En effet, dans le cas d'un objet non résolu (et dont l'image amplifiée est encore non résolue), le facteur d'amplification  $\mu$  correspond à une augmentation directe du flux total de l'objet et donc de son rapport signal-sur-bruit. L'exemple le plus connu parmi les LBGs amplifiées est celui de CB58 (Yee et al., 1996), une galaxie à  $z = 2.7$  en arrière-plan d'un amas massif. Son amplification d'un facteur total de  $\sim 30$  en a fait un cas exemplaire pour l'étude du continuum spectral dans l'ultraviolet au repos (Pettini et al., 2000), des raies nébulaires et de la métallicité du gaz (Teplitz et al., 2000), ou des propriétés de l'infrarouge (Siana et al., 2008) et du gaz moléculaire (Baker et al., 2004). Cette objet a très largement contribué à notre compréhension des galaxies distantes, mais est resté unique en son genre jusque  $\sim 2007$  et la découverte de nouveaux exemples brillants.

Le continuum spectral intégré de 'l'oeil cosmique' (Smail et al., 2007), que nous avons présenté au chapitre précédent montre ainsi un signal- sur-bruit très élevé (Figure 3.1), et largement comparable aux résultats de Shapley et al. (2003) obtenus par empilage de plusieurs centaines de LBGs au même redshift. Le nombre d'arc amplifiés de ce type a largement augmenté depuis ces dernières années, et leur brillance permet de :

- Détecter ces galaxies distantes avec *Spitzer* et contraindre ainsi leur SED et leur masse stellaire
- Détecter les raies d'émission du gaz et mesurer la métallicité et la masse dynamique sur un grand nombre d'objets
- Mesurer les propriétés des raies d'absorption dans l'ultraviolet au repos, et notamment la raie Lyman- $\alpha$

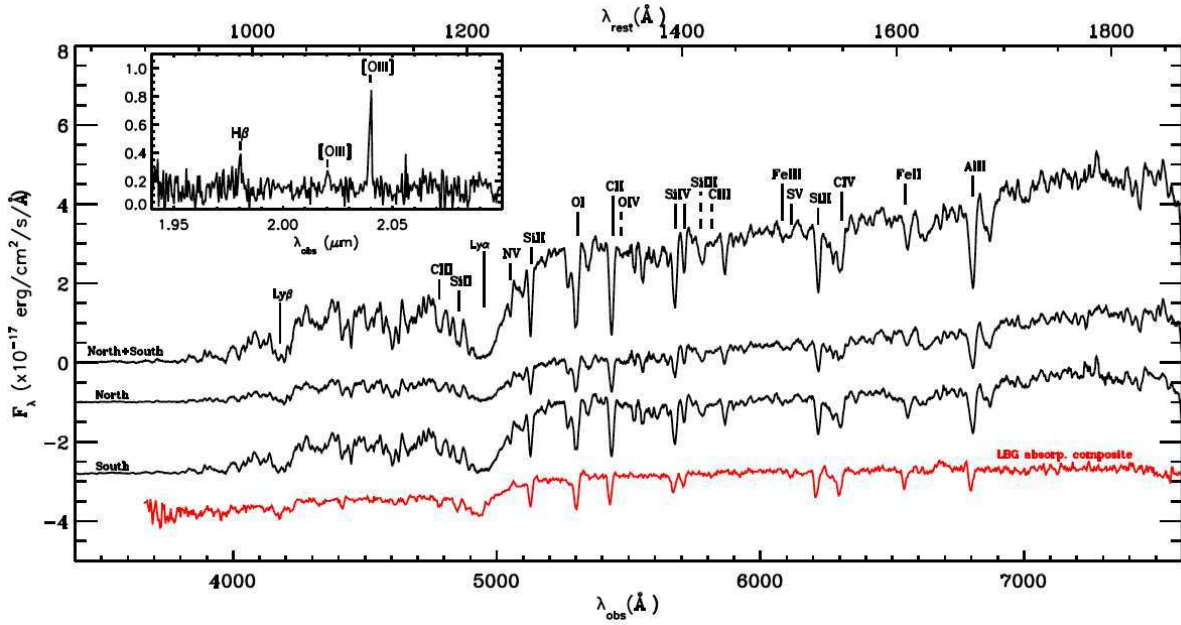


FIGURE 3.1 – Observations de l’“oeil cosmique” avec les spectrographes LRIS et NIRSPEC (Smail et al., 2007). Le spectre intégré dans la fente montre un signal sur bruit très important dans le continuum UV au repos (LRIS), comparable aux résultats obtenus par Shapley et al. (2003) en combinant les observations de plusieurs centaines de LBGs (spectre rouge). De même, les raies d’émission de  $H\beta$  et  $[OIII]$  dans le proche-infrarouge sont parfaitement détectées (encart).

- Etudier ces objets aux plus grandes longueurs d’ondes pour caractériser le contenu des poussières et du gaz moléculaire

Suivant la brillance des objets, ils est possible d’effectuer ce type d’études en un temps de pose nettement plus court que pour un objet typique non amplifié, ou alors d’atteindre des sources intrinsèquement beaucoup plus faibles, et donc d’élargir l’espace des paramètres.

### 3.2 Les émetteurs Lyman- $\alpha$ faibles et la relation taille-masse

*Richard et al. 2007*

*Richard et al. 2012 à soumettre*

Au cours des grands relevés d’images multiples dans les amas MACS et LoCuSS, tels que je les ai détaillés au chapitre 1, je me suis intéressé à l’étude des propriétés physiques de cet échantillon de galaxies distantes. La grande majorité des objets à  $z > 1.7$  a été confirmé au moyen de la raie Lyman- $\alpha$ , à 1216 Å au repos, qui est le meilleur moyen de mesurer le décalage spectral même dans le cas d’objets à la photométrie très faible (jusqu’à 26 AB). A ce titre, j’ai construit en 2007 un échantillon d’émetteurs Lyman- $\alpha$  (LAEs) intrinsèquement très peu lumineux et amplifiés par l’amas de galaxies Abell 68. Ces données ont été obtenues en regroupant de la spectroscopie multi-objets avec LRIS mais aussi une cartographie des “lignes critiques” à  $z > 3$  effectuée dans le cadre de la thèse de Michael Santos à Caltech (Santos et al., 2004). Au final, nous avons pu mesurer le décalage spectral de 26 sources d’arrière plan, y compris 7 LAEs faibles au coeur de l’amas (Figure 3.2, à gauche).

La galaxie la plus distante à  $z = 5.4$  est un système de trois images compactes amplifiées chacune par un facteur  $\mu \sim 10$ , non résolues sur les images de la caméra WFPC2 du télescope spatial, et montrant une très forte raie d’émission Lyman- $\alpha$  (Fig. 3.2, à droite). Grâce à l’ajout de photométrie dans le proche infrarouge, nous avons pu apporter des contraintes sur la masse stellaire ( $\sim 2 \cdot 10^9 M_\odot$ ), la taille (diamètre  $< 600$  parsecs) et le taux de formation stellaire surfacique ( $> 15 M_\odot/\text{kpc}^2$ ), qui font de cette galaxie un exemple similaire à l’objet à  $z = 5.6$  découvert en “aveugle” par Ellis et al. (2001) derrière l’amas Abell 2218. Les propriétés globales de ce petit échantillon de LAEs faibles nous ont également permis de mettre des contraintes sur leur densité numérique à des domaines de luminosité ( $L_{Ly\alpha} \sim 10^{41} \text{ erg s}^{-1}$ ) non couverts par les grands relevés de l’époque (Fynbo et al., 2001, 2003; Nilsson et al., 2007).

Depuis 2007, j’ai commencé à construire à Caltech et Durham, en collaboration avec Daniel Stark, un catalogue spectroscopique de galaxies amplifiées par l’amas lentille Abell 1689. Celui-ci, comme je l’ai par ailleurs mentionné au chapitre 1.2, est actuellement l’amas couvrant la plus grande surface dans le plan source à une très forte amplification ( $\mu > 10$ ), ce qui explique la très grande quantité de galaxies distantes découvertes jusqu’à présent (Fig. 3.3 à gauche).

Parmi les galaxies distantes mesurées par spectroscopie, je me suis intéressé à l’échan-

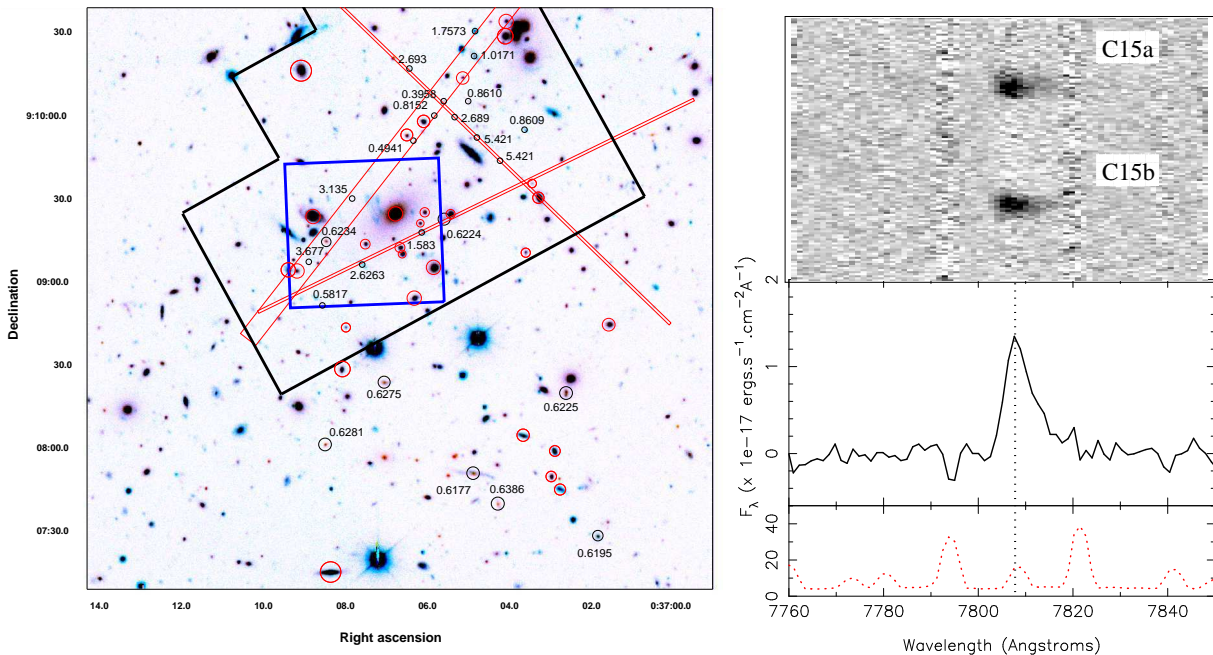


FIGURE 3.2 – À gauche : mesures de décalages spectraux dans le champ de l’amas Abell 68, obtenues par de la spectroscopie en fente longue et/ou multi-objet avec LRIS (Richard et al., 2007). À droite : émission Lyman- $\alpha$  pour la source intrinsèquement très faible à  $z = 5.4$ . L’asymétrie de la raie est bien visible.

tillon de galaxies amplifiées contenues dans le champ de vue ACS, et dont la grande majorité sont des systèmes multiples. Au total, celui-ci contient 80 sources dans le domaine  $0.8 < z < 5.2$ , amplifiées par un facteur  $\mu > 5 - 10$ . Les décalages spectraux ont été mesurés à partir des raies d’émission ( $[OII]$  ou Lyman- $\alpha$ ) ou des raies d’absorption dans le continuum des objets les plus brillants (Figure 3.3, à droite). La répartition des objets de l’échantillon en fonction de leur décalage spectral est très inégale, et montre clairement trois surdensités d’objets dans les fenêtres autour de  $z = 1.8$ ,  $z = 2.5$  et  $z = 3.0$ . On voit ici les effets de regroupement (*clustering*) des sources distantes, qui contribue également au grand nombre d’images multiples formées au coeur de l’amas.

Le domaine  $1.5 < z < 3.0$  est particulièrement intéressant, car il contient 31 sources pour lesquelles nous avons pu construire la SED en combinant la photométrie de Hubble (couvrant le domaine visible) avec des images au sol prises par ISAAC dans le proche infrarouge et des données du satellite *Spitzer* à  $3.6$  et  $4.5 \mu\text{m}$ . La distribution des masses stellaires montre clairement l’avantage de l’amplification : comparé aux autres grands échantillons de LBGs non lentillées étudiés par Erb et al. (2006a) et Shapley (2011), les galaxies amplifiées par Abell 1689 couvrent un domaine de masses stellaires complémentaire ( $10^{7-9} M_\odot$ ) presque entièrement disjoint (Figure 3.4).

Nous avons par ailleurs, dans le cadre de la thèse de doctorat d’Allison Mann à l’université de Copenhague, mesuré la morphologie des sources reconstruites de cet échantillon. Après correction de l’effet de lentille à l’aide du logiciel Lenstool, les images du télescope

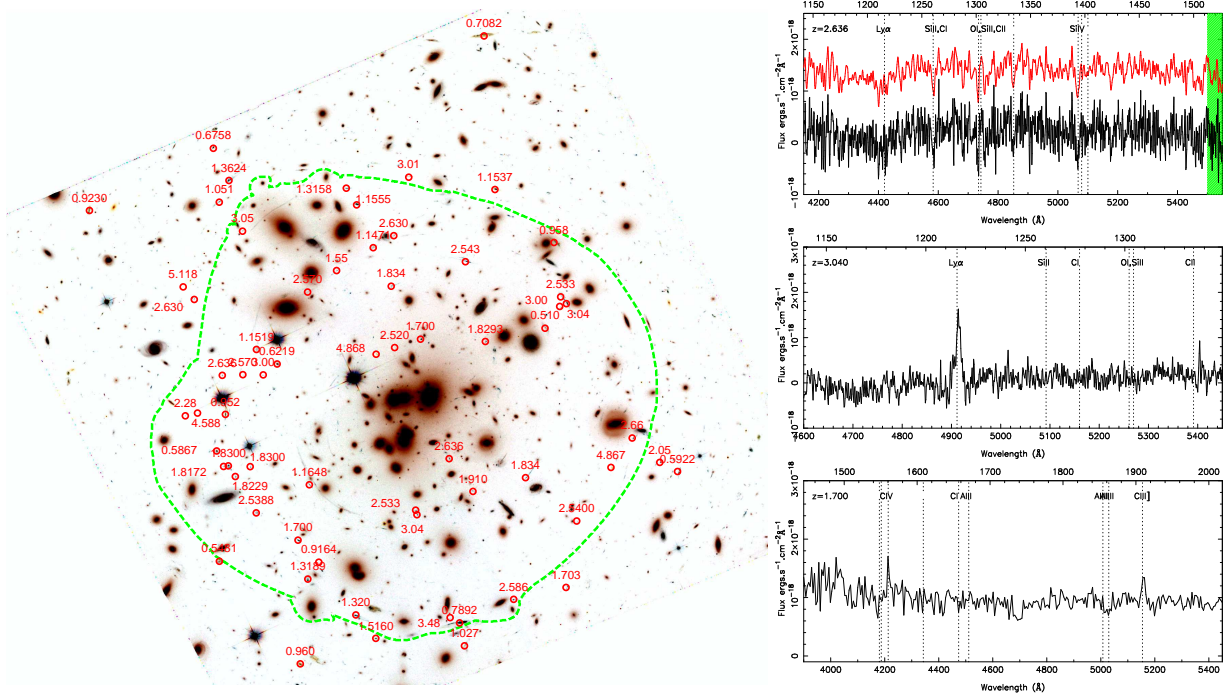


FIGURE 3.3 – Résultat des observations spectroscopiques dans le champ de l’amas Abell 1689. Plusieurs dizaines de galaxies faibles ont été mesurées. A droite : exemples de spectres extraits dans le visible : le décalage spectral des sources est estimé par la raie d’émission Lyman- $\alpha$ , ou de multiples raies d’émission ou d’absorption dans l’UV au repos.

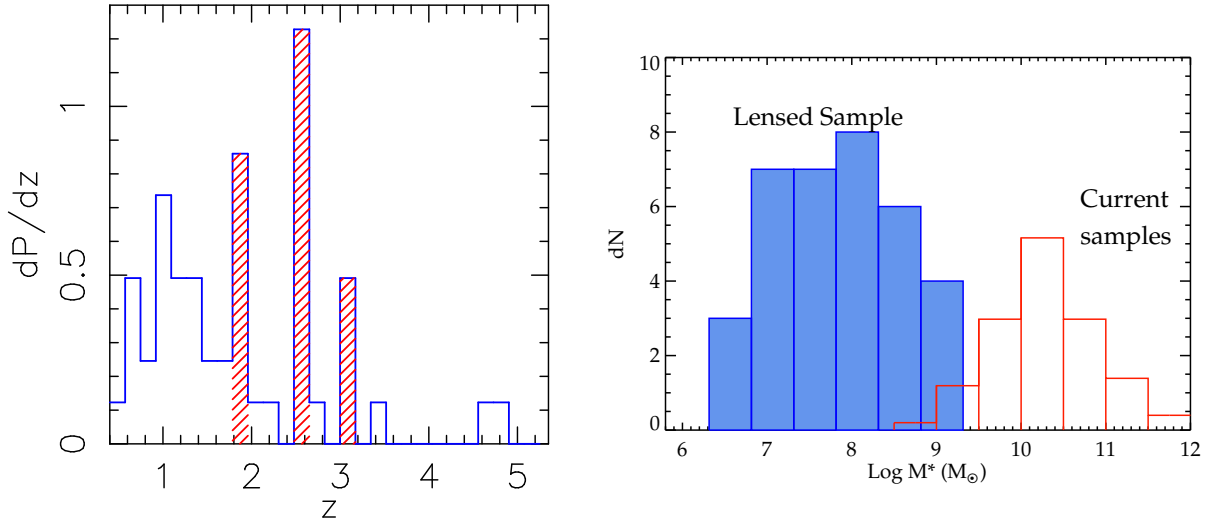


FIGURE 3.4 – Histogramme de la répartition en décalage spectral (à gauche) et en masse stellaire (à droite) des galaxies lentillées par l’amas Abell 1689. L’échantillon montre clairement des surdensités avec 3 pics en décalage spectral. Les masses stellaires mesurées sont très faibles, et complémentaires aux échantillons de LBGs brillantes.



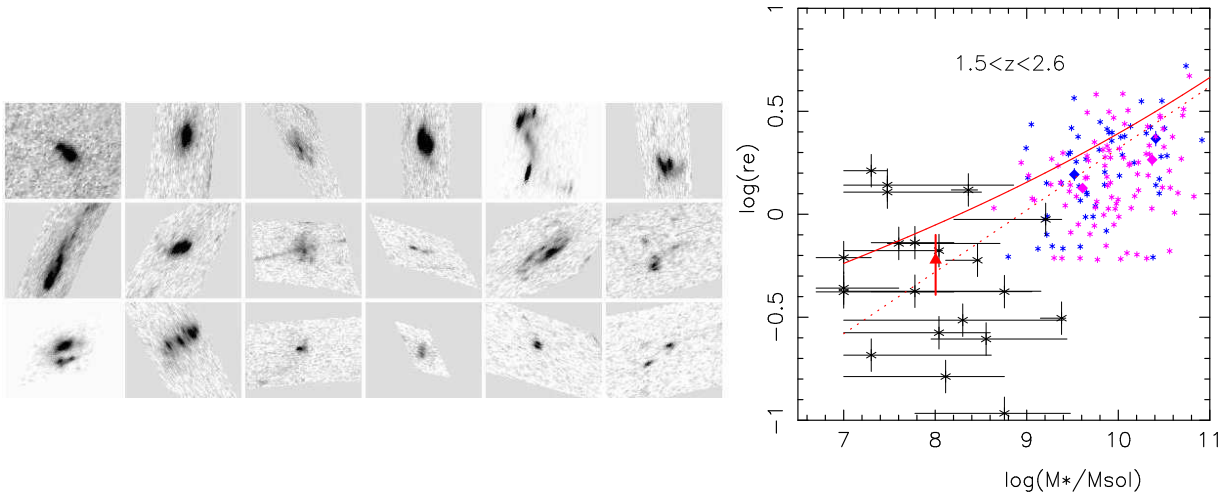


FIGURE 3.5 – A gauche : exemples de reconstructions dans le plan sources des galaxies distantes lentillées par l’amas Abell 1689. A droite : localisation des sources de notre échantillon à  $1.5 < z < 2.5$  dans un diagramme taille-masse, comparé à l’échantillon de LBGs étudié par Law et al. (2012). La courbe en traits pointillés montre l’ajustement de (Mosleh et al., 2011) pour des galaxies massives dans le même domaine de redshift, et celle en trait plein à la relation mesurée dans les galaxies de l’Univers local (Shen et al., 2003). Nos observations semblent confirmer l’extension de la relation trouvée par (Mosleh et al., 2011) aux faibles masses.

Hubble de chaque source dans la bande F775W (qui fournit le meilleur signal) ont été ajustées par des profils paramétriques de galaxies à l’aide de GALFIT (Peng et al., 2002). La réponse impulsionnelle de la caméra ACS a été prise en compte, pour chaque objet, en appliquant la même correction de l’effet de lentille (Fig. 3.5). Le paramètre principal que nous avons ainsi mesuré est le rayon de demi-lumière,  $r_{1/2}$ , sous sa forme circularisée (beaucoup de sources ayant une forme très elliptique). En combinant ces résultats avec les mesures de masse stellaire, nous avons pu positionner cet échantillon sur un diagramme taille-masse ( $r_{1/2}$ - $M_*$ , Fig. 3.5).

Sur cette représentation, on voit clairement que l’échantillon de galaxies lentillées explore un domaine de paramètres très différent de celui des LBGs de (Law et al., 2012) au même redshift, avec des masses typiques de l’ordre de  $10^8 M_{\odot}$  et des tailles de  $\sim 0.5$  kpc. Les deux échantillons montrent une dispersion très large, mais semblent toutefois se situer en dessous de la relation taille-masse mesurée dans l’Univers local (Shen et al., 2003). Les valeurs médianes (symboles pleins dans la Figure 3.5) sont compatibles avec la relation de puissance  $r_{1/2} \propto M_*^{0.3}$  ajustée par (Mosleh et al., 2011) sur un échantillon de galaxies massives.

### 3.3 La relation masse-métallicité

*Richard et al. 2011 line ratios*

Au cours de notre projet cherchant à mesurer les propriétés résolues des galaxies distantes à l’aide de spectrographes IFUs (dans le cadre de la thèse de doctorat de Tucker Jones à Caltech, voir la section 2.2), une étape du processus de sélection de notre échantillon a consisté à mesurer le flux total (et la brillance surfacique) des raies d’émission du gaz (notamment  $[OIII]$ ,  $H\alpha$ ) pour un grand nombre de candidats. A l’aide de spectroscopie à fente sur NIRSPEC, ces raies ont pu être détectées avec un rapport signal-sur-bruit suffisant, et pour beaucoup d’objets nous avons pu couvrir l’ensemble des raies du gaz détectables dans le proche-infrarouge ( $[OII]$ ,  $H\beta$ ,  $[OIII]$ ,  $H\alpha$ ,  $[NII]$ ). J’ai tâché d’utiliser ce sous-produit de notre projet IFU pour mesurer les propriétés physiques globales des sources de l’échantillon : en effet, il existe des calibrations établies entre les mesures du rapport de flux dans les raies d’émission du gaz et sa métallicité (Nagao et al., 2006; Pagel et al., 1979), prise ici comme l’abondance en oxygène  $Z=12+\log(O/H)$ .

En combinant les différents rapports de raies de notre échantillon NIRSPEC et ceux de 5 objets pris dans la littérature (Allam et al., 2007; Frye et al., 2007; Bradač & et al., 2008; Limousin et al., 2010; Hasinger et al., 1998; Frye et al., 2002; Ebbels et al., 1996; Lemoine-Busserolle et al., 2003; Bian et al., 2010), j’ai pu mesurer la métallicité pour 28 arcs à un décalage spectral  $1.5 < z < 3.2$ , et amplifiés d’un facteur  $\mu \sim 3 - 50$ . J’ai également utilisé la photométrie disponible dans le visible, le proche-infrarouge, et les deux bandes *Spitzer* à 3.6 et 4.5  $\mu\text{m}$ , pour construire les SEDs individuelles de ces objets en en déduire une estimation de leur masse stellaire (de manière similaire à l’échantillon de Abell 1689 décrit dans la section précédente).

Comparées aux grands échantillons de LBGs étudiés par Erb et al. (2006a), Maiolino et al. (2008) et Mannucci et al. (2009) pour mesurer leurs masses et leurs métallicités, la répartition de nos galaxies lentillées est assez différente : même si elles se situent dans un domaine similaire de masses stellaires ( $10^{9-11} M_{\odot}$ , Fig. 3.6), leur taux de formation stellaire est généralement beaucoup plus faible, de l’ordre de 1-10  $M_{\odot}/\text{an}$  typiquement (Fig. 3.6). Cet effet provient certainement de la méthode de sélection de chaque échantillon : les LBGs sont par construction très brillantes dans leur continuum UV (de manière à produire une cassure de Lyman importante), tandis que l’échantillon amplifié a été sélectionné par le facteur d’amplification gravitationnelle.

Les mesures de masse stellaire et de métallicité pour les LBGs distantes ont mis en évidence une évolution, avec le décalage spectral, de la *relation masse-métallicité* bien calibrée dans l’Univers local (Fig. 3.7). Cet effet apparaît clairement dans les échantillons de Erb et al. (à  $z = 2$ ) et Mannucci et al. (AMAZE, LSD,  $z \sim 3$ ), avec une métallicité typiquement  $\sim 10$  fois plus faible pour des objets de  $10^9 M_{\odot}$ . Cette évolution semble la plus importante pour les objets les moins massifs. En plaçant les galaxies de notre échantillon dans ce même diagramme masse-métallicité, nous avons remarqué qu’elles ne suivaient pas l’évolution de manière aussi forte que les LBGs : ceci est visible sur l’échantillon dans son ensemble, mais aussi en mesurant la métallicité après “empilage” dans deux domaines de masse stellaire (Fig. 3.7).

Récemment, Mannucci et al. (2010) ont proposé que l’évolution observée entre  $z = 0$  et  $z = 3$  sur la relation masse-métallicité serait expliquée par l’influence d’un troisième paramètre : le taux de formation stellaire (SFR). En effet, celui-ci étant généralement

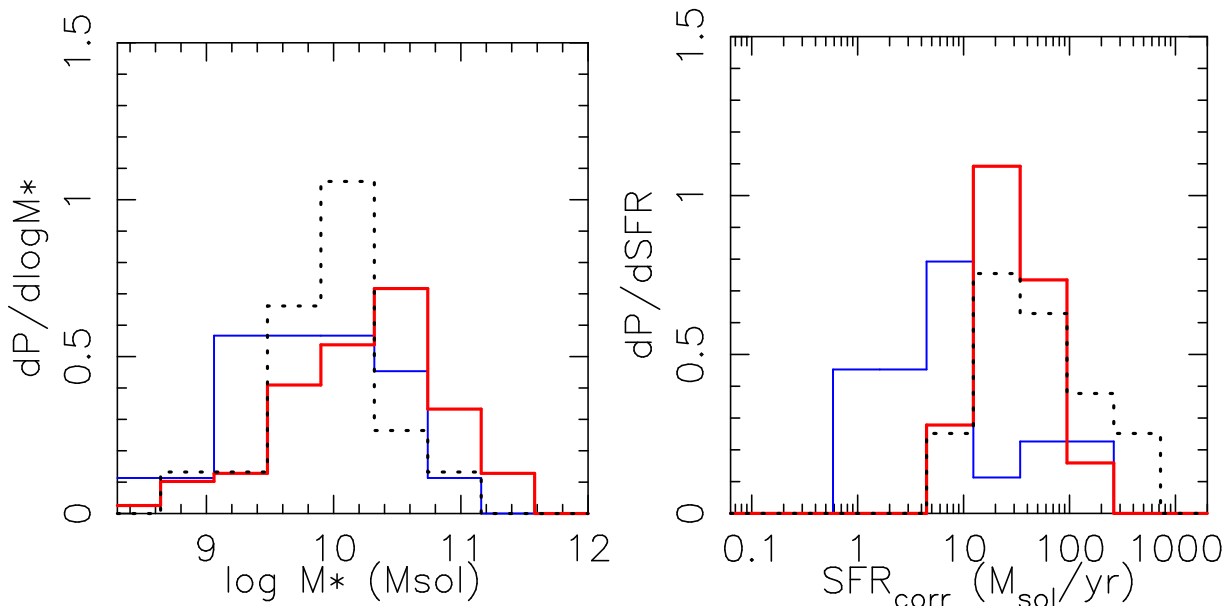


FIGURE 3.6 – Propriétés de l'échantillon de galaxies étudié dans (Richard et al., 2011a) (en bleu), par rapport aux autres échantillons de Erb et al. (2006a) et de Maiolino et al. (2008) (en rouge et noir). Les galaxies lentillées ont un SFR typiquement plus faible que les autres échantillons, mais une masse stellaire comparable.

plus intense pour les galaxies distantes, il entraînerait une baisse de leur métallicité à une masse stellaire donnée, à cause des apports plus importants de gaz primordial de faible métallicité.

L'influence du SFR explique ainsi la plus faible évolution observée sur notre échantillon : nos galaxies amplifiées ayant un SFR typiquement plus faible que les LBGs non lentillées, elles montrent une différence plus faible vis à vis des galaxies de l'Univers local. Nous avons quantifié ce résultat en mesurant l'écart à la *relation fondamentale de métallicité* proposée par Mannucci et al. (2010) et prenant en compte le SFR pour reproduire la relation masse-métallicité à tous les décalages spectraux (Fig. 3.7). Nous n'avons pas observé d'écart significatif à cette relation dans notre échantillon, ce qui semble confirmer le résultat de Mannucci et al. (2009).

### 3.4 Les galaxies poussiéreuses distantes

Depuis mon travail de thèse sur l'ajustement de la SED d'une galaxie distante ( $z = 6.7$ ) détectée par Spitzer (Egami et al., 2005) je collabore avec le groupe d'Eiichi Egami à l'Université d'Arizona sur les observations de galaxies lentillées à grande longueur d'onde  $> 3\mu\text{m}$ , notamment avec les observatoires spatiaux Spitzer et Herschel. Les données des instruments IRAC et MIPS ( $3\text{--}30\mu\text{m}$ , moyen-infrarouge) couvrant les champs d'amas-lentilles nous permettent d'étudier des populations différentes d'objets à redshift intermédiaire (essentiellement  $1 < z < 3$ ) non détectées dans le domaine visible

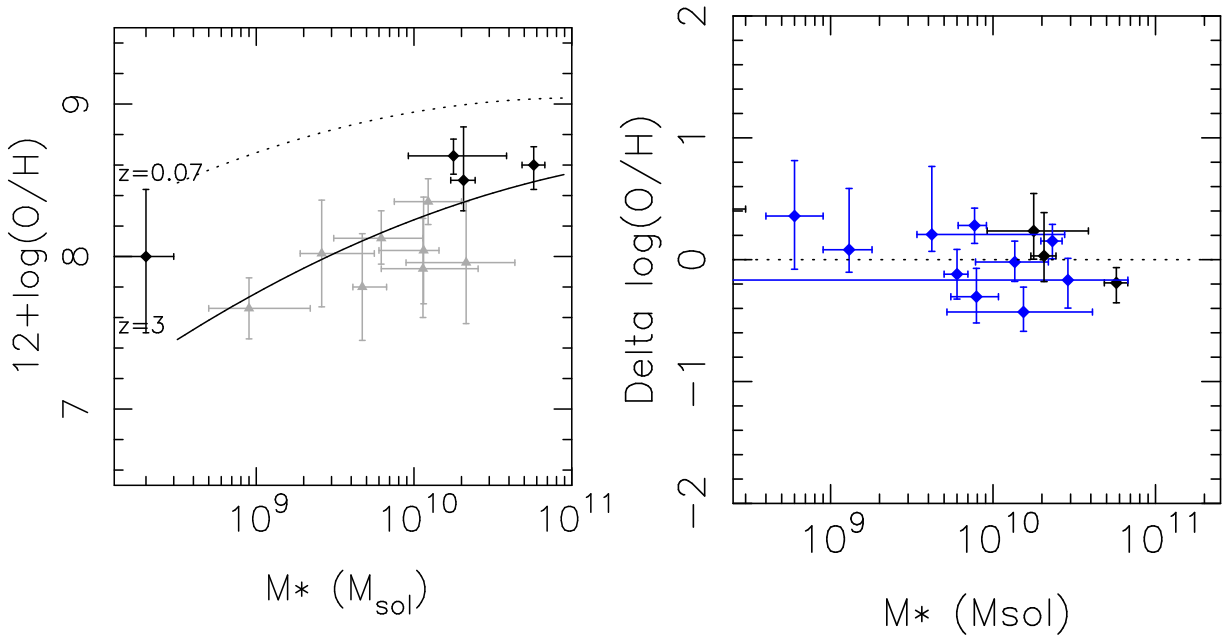


FIGURE 3.7 – Mesure de la relation masse-métallicité sur l'échantillon NIRSPEC à gauche, pour les sources à  $z \sim 3$  (symboles noirs). Ceux-ci ont une métallicité généralement supérieure à la tendance observée dans d'autres échantillons à  $z = 3$  (symboles gris), même si ils montrent la même évolution par rapport à la relation à  $z = 0.07$  (ligne pointillée). A droite : écart entre la métallicité prédite par la relation fondamentale de métallicité proposée par Mannucci et al. (2010) et nos observations.

à cause de l’atténuation par les poussières. En utilisant un échantillon d’amas de galaxies bien modélisés, nous avons pu corriger des effets d’amplification dans les comptages de sources à  $24\ \mu\text{m}$  et atteindre des profondeurs inégalées (Rigby et al., 2008).

L’utilisation des télescopes gravitationnels est encore plus avantageuse pour ce qui concerne Herschel (100-500 $\mu\text{m}$ , infrarouge-lointain). Le *bruit de confusion* dans ce cas est très important, ce qui donne des sensibilités bien moins bonnes (à  $f_\nu$  constant) que les images Spitzer à  $24\ \mu\text{m}$  (et encore moins qu’ALMA). Les amas lentilles sont un moyen très efficace de contrebalancer ces limites grâce à un double effet bénéfique : (1) l’effet d’amplification permet d’augmenter les niveaux de sensibilité des instruments et (2) l’amplification s’accompagne d’un effet de dilution des sources en arrière-plan des amas qui diminue fortement la confusion. Cette méthode a été utilisée par plusieurs groupes : je collabore ainsi avec les membres des équipes du “temps garanti” Herschel (PACS/SPIRE), pour un programme d’observation de 10 amas lentilles focalisé sur la mesure des comptages de sources faibles (Altieri et al., 2010). Mais l’essentiel de mon travail sur les observations Herschel concerne le Herschel Lensing Survey (HLS, Egami et al. 2010).

Le programme HLS a débuté comme un des programmes ‘clé’ Herschel afin de couvrir 44 amas de galaxies supplémentaires avec les instruments PACS et SPIRE. Les premiers résultats obtenus sur l’amas ‘du boulet’ (Bullet Cluster) ont montré l’intérêt des observations à  $100 - 500\ \mu\text{m}$  pour caractériser le pic de l’émission des poussières dans des galaxies distantes, avec un rapport signal-sur-bruit très élevé (Rex et al. 2010, Fig. 3.8). Cette mesure est très importante pour pouvoir comparer l’allure générale de la distribution spectrale en énergie avec les mesures faites dans les galaxies proches : nous avons pu en déduire des mesures précises sur la luminosité infrarouge totale, la température des poussières et le taux de formation stellaire lié à cette émission. Plusieurs galaxies détectées sont des sources à  $z \sim 3$  très amplifiées ( $\mu > 10$ ) et correspondent à des luminosités infrarouge de l’ordre de  $10^{11}\ L_\odot$  après correction de l’amplification, ce qui empêcherait leur détection par Herschel en l’absence de l’effet de lentille.

Parallèlement, nous avons découvert avec mes collaborateurs de Durham (notamment Mark Swinbank, Ian Smail, Alastair Edge) la source submillimétrique amplifiée la plus brillante de l’époque (une fois lentillée) à  $z > 1$  (Swinbank et al., 2010), derrière l’amas MACS2135 (Fig. 3.9 à gauche). Cette découverte, bien qu’un peu fortuite (les observations cherchaient au départ à détecter l’oeil cosmique, voir la Section 2.1), nous a apporté une grande quantité d’informations sur une galaxie sub-millimétrique à  $z = 2.3$ . En effet, la combinaison de sa brillance et de son amplification par l’amas de galaxies d’un facteur  $\sim 30$  nous a permis d’utiliser des interféromètres (notamment le Submm-Array et l’interféromètre du plateau de Bure) pour mesurer le *continuum* et les raies de CO à très haute résolution (Fig. 3.9 à droite). La morphologie de cette source est très particulière : elle est composée de plusieurs blocs (ou ‘clumps’) dont la taille est similaire aux nuages moléculaires géants observés dans les galaxies proches (Swinbank et al., 2011).

Aucune source de ce type (aussi brillante) n’ayant été détectée dans le programme clé HLS (44 amas), nous en avons déduit que la probabilité d’une telle observation était relativement rare. Afin d’en trouver d’avantage, nous avons donc initié deux programmes de type ‘snapshot’ (imagerie instantanée) sur Herschel, pour observer avec SPIRE 279

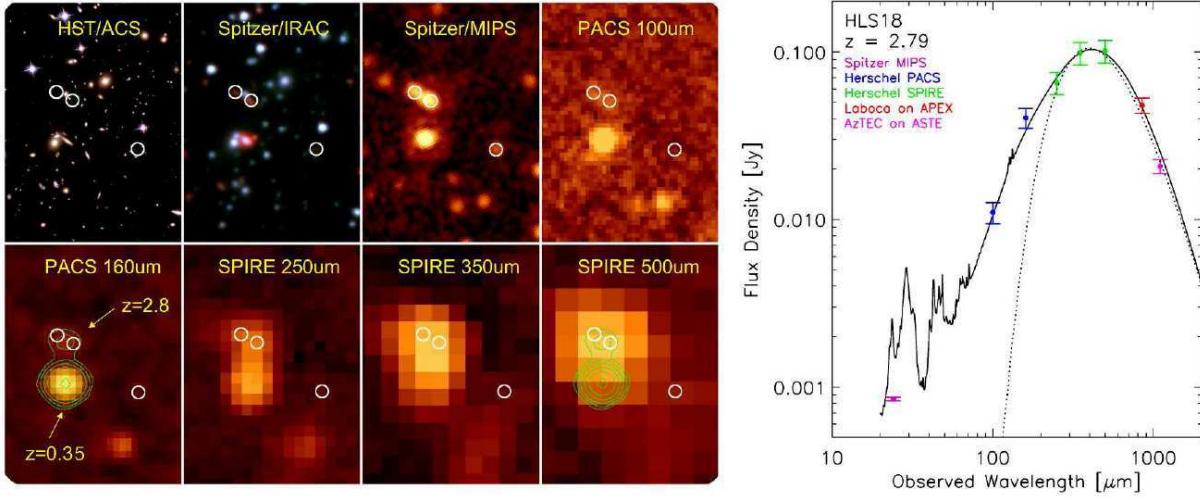


FIGURE 3.8 – Détection dans les bandes Herschel (PACS/SPIRE) et mesure de la SED des poussières dans une galaxie à  $z = 2.8$  amplifiée par l’amas du ‘Boulet’. Cette source amplifiée à  $z \sim 3$  a une luminosité intrinsèque de  $\sim 3 \cdot 10^{11} L_{\odot}$ .

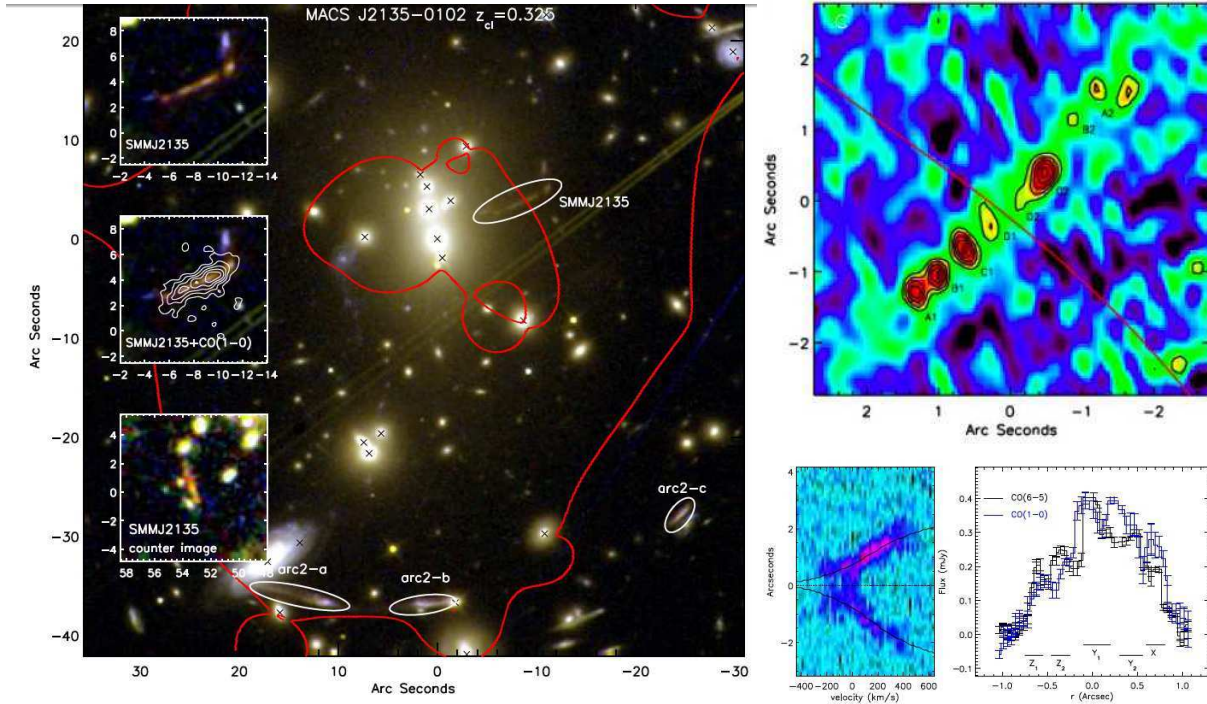


FIGURE 3.9 – A gauche : détection de la source SMMJ2135 amplifiée au coeur de l’amas MACS2135 par l’instrument HST/WFC3. A droite : résolution de l’émission dans le continuum radio en de multiples régions de taille 200-300 pcs. Cette source est tellement brillante qu’elle a été détectée dans de multiples raies de CO.



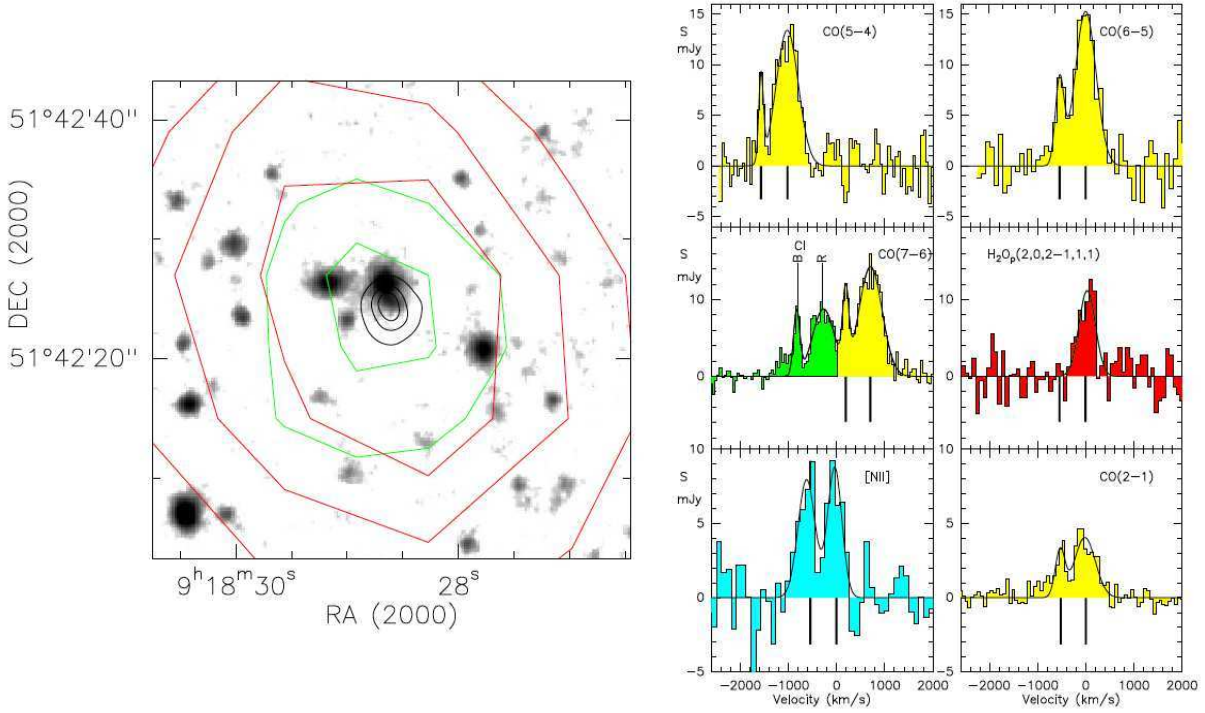


FIGURE 3.10 – détection d’une galaxie extrêmement lumineuse dans l’infrarouge à  $z = 5.4$ , dans le champ de l’amas Abell 773 (à gauche). L’amplification semble provenir essentiellement d’une autre galaxie en arrière plan de l’amas et alignée avec la source. A droite : les multiples raies mesurées dans le domaine millimétrique : on observe des détections pour plusieurs raies de CO, mais aussi CI, H<sub>2</sub>O et [NII].

et 353 amas, respectivement. Les résultats du premier programme ont déjà porté leurs fruits. Nous avons d’ores et déjà identifié une dizaine de sources extrêmement brillantes (du même type que la source de Swinbank et al.), certaines se situant même à plus grande distance. Le décalage spectral de ces sources a été confirmé par la mesure des raies de CO, notamment à l’aide de l’antenne de 30 mètres de l’IRAM au Pico Veleta (Espagne). Notre source la plus distante, située à  $z = 5.2$  dans le champ de l’amas Abell 773, a ainsi montré des raies intenses de CO, mais aussi de H<sub>2</sub>O, CI, et, pour la première fois à une telle distance, de [NII] (Combes et al. 2012, Fig. 3.10). Ces résultats indiquent également la présence de deux composantes en vitesse, et donc une dynamique du gaz relativement complexe dans cet objet.

### 3.5 Perspectives

A court terme, l’étude des galaxies distantes très faibles au travers de leur émission Lyman- $\alpha$  va se développer considérablement grâce à l’arrivée de l’instrument MUSE (pour Multi Unit Spectroscopic Explorer, Bacon et al. 2010) au Very Large Telescope (courant 2013). MUSE est un instrument de seconde génération pour le VLT constitué de 24 IFUs



opérant dans le visible, associés à un système d'optique adaptative. Ces 24 IFUs couvrent un champ continu de  $1 \text{ arcmin}^2$  et une longueur d'onde entre 4800 et 9600 Å, ce qui en fait l'instrument idéal pour étudier de manière systématique l'émission Lyman- $\alpha$  à  $z = 2.8 - 6.7$ . Un tel champ de vue est également très bien adapté pour couvrir la zone d'amplification maximale au coeur d'un amas lentille, et ainsi atteindre des flux Lyman- $\alpha$  extrêmement faibles (de l'ordre de  $10^{-19} \text{ erg/s/cm}^2$  après correction de l'amplification). Les statistiques obtenues en combinant l'échantillon de  $\sim 10$  amas lentilles prévus dans le cadre du temps garanti de MUSE permettront de caractériser les comptages et la fonction de luminosité dans sa partie la plus faible. C'est un enjeu important pour connaître l'apport des galaxies les plus faibles au processus de réionisation du milieu intergalactique (Stark et al., 2011).

Concernant l'étude de la relation masse-métallicité à grand  $z$ , KMOS est l'autre instrument important qui commencera ses opérations au VLT en 2013. KMOS est composé de multiples petits IFUs déployables sur un grand champ, et observant dans le domaine proche infrarouge. Avec sa capacité de multiplexage, il sera parfaitement adapté pour mesurer les raies d'émission (et les propriétés physiques associées : métallicité, masse dynamique, extinction, taux de formation stellaire), pour un grand nombre d'arcs et d'arcslets identifiés dans le champ d'un amas. Notamment, pour les émetteurs Lyman- $\alpha$  les plus brillants à  $z > 2.8$ , la coordination d'observations entre les deux spectrographes MUSE (pour l'émission Ly $\alpha$  et les absorptions dans l'ultraviolet) et KMOS (pour la mesure des raies d'émission des régions HII) semble parfaitement naturelle.

L'objectif à plus long terme des programmes multi-longueurs d'ondes est de cartographier la distribution spectrale en énergie d'un très grand nombre de sources à grand *redshift*, depuis l'infrarouge moyen jusqu'aux ondes millimétriques, en combinant les données Spitzer, Herschel, IRAM puis ALMA. Nous nous sommes assurés pour cela que les amas du programme clé HLS étaient accessibles depuis l'hémisphère sud. La sensibilité inégalée d'ALMA permettra de détecter l'émission due aux poussières dans des galaxies typiques à  $z > 3$ , avec de l'ordre de 100 objets par arcminute carrée dans les sondages profonds. Cette sensibilité se prolongera à l'identique jusqu'à  $z \sim 10$ , où ALMA sera plus efficace que les instruments visible/proche-infrarouges, et sera complémentaire au futur JWST. Toutefois, les sondages profonds avec ALMA seront parfaitement complémentaires d'observations similaires avec les ELTs ou le JWST, car on cherche à la fois à étudier le contenu stellaire et le contenu en poussières des galaxies à très grand *redshift* pour comprendre les processus de formation des premières galaxies. Dans ce contexte, j'ai initié un premier programme ALMA ('science préliminaire') utilisant le premier réseau de 16 antennes, pour observer l'amas de galaxies Abell 1689 pour lequel nous avons le plus grand nombre de décalages spectraux mesurés. En couvrant l'ensemble de la région amplifiée par un facteur 10 ou plus (Fig. 3.11), nous espérons détecter des sources très amplifiées dans leur continuum à 3 mm, ainsi que l'émission CO pour les sources submillimétriques brillantes connues dans cet amas.

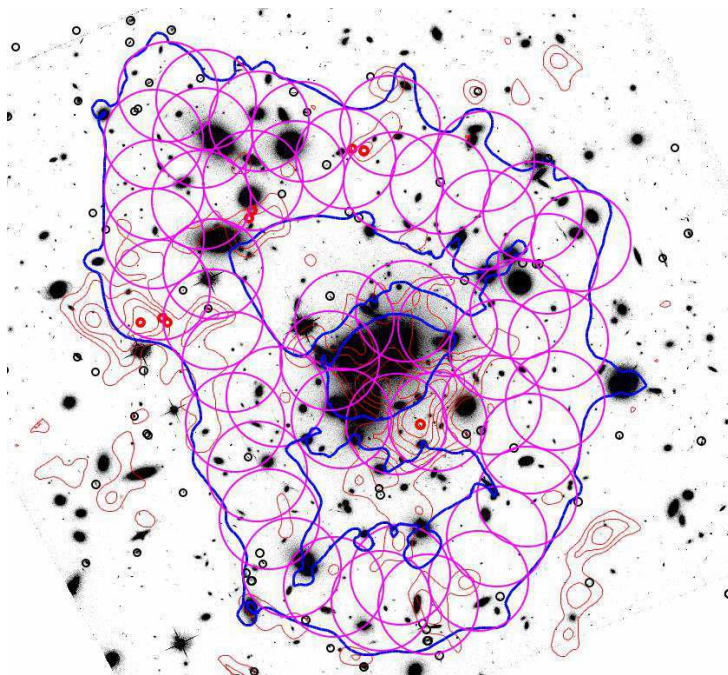


FIGURE 3.11 – Couverture typique avec ALMA de la région d’amplification maximale ( $\mu > 10$ ) de l’amas Abell 1689 (délimitée par les courbes bleues). En combinant  $\sim 40$  pointés se superposant, on espère détecter un grand nombre de sources très amplifiées dans le continuum radio à 1.3 mm, y compris plusieurs sources submillimétriques connues (symboles rouges).



# Liste des publications

## Revue à comité de lecture (h=26)

1. Laporte, N., Pelló, R., Hayes, M., Schaerer, D., Boone, F., **Richard**, J., et 3 coauteurs, *The bright-end of the luminosity function at  $z \sim 9$* , 2012, A&A sous presse.
2. Ota, K., **Richard**, J., Iye, M., Shibuya, T., Egami, E., Kashikawa, N., *A Search for  $z=7.3$  Ly $\alpha$  Emitters behind Gravitationally Lensing Clusters*, 2012, ApJ sous presse.
3. Decarli, R., Walter, F., Neri, R., Bertoldi, F., Carilli, C., Cox, P., Kneib J.-P., Lestrade J.-F., Maiolino, R., Omont, A., **Richard**, J. et 3 coauteurs, *Ionized nitrogen at high redshift*, 2012, ApJ sous presse.
4. Combes, F., Rex, M., Rawle, T., Egami, E., Boone, F., Smail, I., **Richard**, J., et 16 coauteurs, *A bright  $z = 5.2$  lensed submillimeter galaxy in the field of Abell 773. HLSJ091828.6+514223*, 2012, A&A, 538, 4
5. Schenker, M., Stark, D., Ellis, R., Robertson, B., Dunlop, J., McLure, R., Kneib, J.-P., **Richard**, J., *Keck Spectroscopy of Faint  $3 < z < 8$  Lyman Break Galaxies : Evidence for a Declining Fraction of Emission Line Sources in the Redshift Range  $6 < z < 8$* , 2012, ApJ, 744, 179
6. Riehm, T., Mörtzell, E., Goobar, A., Amanullah, R., Dahlén, T., Jönsson, J., Limousin, M., Paech, K., **Richard**, J., *Near-IR search for lensed supernovae behind galaxy clusters. III. Implications for cluster modeling and cosmology*, 2011, A&A, 536, 94
7. Amanullah, R. et 19 coauteurs, *A Highly Magnified Supernova at  $z = 1.703$  behind the Massive Galaxy Cluster A1689*, 2011, ApJ, 742, 7
8. Swinbank, M., Papadopoulos, P., Cox, P., Krips, M., Ivison, R., Smail, Ian, Thomson, A., Neri, R., **Richard**, J., Ebeling, H., *The Interstellar Medium in Distant Star-forming Galaxies : Turbulent Pressure, Fragmentation, and Cloud Scaling Relations in a Dense Gas Disk at  $z = 2.3$* , 2011, ApJ, 742, 11
9. Boone, F., et 25 coauteurs, *Far-infrared constraints on the contamination by dust-obscured galaxies of high- $z$  dropout searches*, 2011, A&A, 534, 124
10. Dessauges-Zavadsky, M., Christensen, L., D’Odorico, S., Schaerer, D., **Richard**, J., *Nebular and global properties of the gravitationally lensed galaxy “the 8 o’clock arc”*, 2011, A&A, 533, 15

11. Laporte, N., Pelló, R., Schaerer, D., **Richard**, J., et 7 coauteurs, *Optical dropout galaxies lensed by the cluster A2667*, 2011, A&A, 531, 74
12. **Richard**, J., Kneib, J.-P., Ebeling, H., Stark, D., Egami, E., Fiedler, A., *Discovery of a possibly old galaxy at  $z=6.027$ , multiply imaged by the massive cluster Abell 383*, MNRAS, 414, 31
13. **Richard**, J., Jones, T., Ellis, R., Stark, D., Livermore, R., Swinbank, M., *The emission line properties of gravitationally lensed  $1.5 < z < 5$  galaxies*, MNRAS, 413, 643
14. Yuan, T., Kewley, L., Swinbank, M., **Richard**, J., Livermore, R., *Metallicity Gradient of a Lensed Face-on Spiral Galaxy at Redshift 1.49*, 2011, ApJ, 732, 14
15. Donnarumma, A. et 12 coauteurs, *Abell 611 II. X-ray and strong lensing analyses*, 2011, A&A, 528, 73
16. Dessauges-Zavadsky, M., D’Odorico, S., Christensen, L., Schaerer, D., **Richard**, J., *Rest-frame UV to optical X-shooter spectrum of the gravitationally lensed galaxy “the 8 o’clock arc” : Dissection of its physical properties*, AN, 332, 307
17. Verdugo, T., Motta, V., Muñoz, R., Limousin, M., Cabanac, R., **Richard**, J., *Gravitational lensing and dynamics in SL2S J02140-0535 : probing the mass out to large radius*, 2011, A&A, 527, 124
18. Jones, T., Ellis, R., Jullo, E., **Richard**, J., *Measurement of a Metallicity Gradient in a  $z = 2$  Galaxy : Implications for Inside-out Assembly Histories*, 2010, ApJ, 725, 176
19. Limousin, M., Jullo, E., **Richard**, J., Cabanac, R., Kneib, J.P., Gavazzi, R., Soucail, G., *Strong Lensing as a Probe of the Mass Distribution Beyond the Einstein Radius. Mass & Light in SL2S J0544-0121, a Galaxy Group at  $z=0.35$* , 2010, A&A., 524, 95
20. Jullo, E., Kneib, J.P., Natarajan, P., D’Aloisio, A., Limousin, L., **Richard**, J. & Schimd, C., *Cosmological constraints from strong gravitational lensing in clusters of galaxies*, Science, 329, 924
21. Massey, R., **Richard**, J. & Kitching T., *The lensing view of Dark Matter*, revue RPP, 73, 6901
22. Altieri, B., et 37 coauteurs, *Herschel deep far-infrared counts through Abell 2218 cluster-lens*, 2010, A&A, 518, 17
23. Zemcov, M., et 30 coauteurs, *First detection of the Sunyaev Zel’dovich effect increment at  $\lambda < 650\mu\text{m}$* , 2010, A&A, 518, 16
24. Pérez-González, P., Egami, E., Rex, M., Rawle, T., Kneib, J.-P., **Richard**, J., et 33 coauteurs, *Improving the identification of high- $z$  Herschel sources with position priors and optical/NIR and FIR/mm photometric redshifts*, 2010, A&A, 518, 15
25. Rawle, T., et 35 coauteurs, *Deep Herschel view of obscured star formation in the Bullet cluster*, 2010, A&A, 518, 14
26. Rex, M., et 47 coauteurs, *The far-infrared/submillimeter properties of galaxies located behind the Bullet cluster*, A&A, 518, 13

27. Egami, E., Rex, M., Rawle, T., Pérez-González, P., **Richard**, J. et 30 coauteurs, *The Herschel Lensing Survey (HLS) : Overview*, 2010, A&A, 518, 12
28. Limousin, M., Ebeling, H., Ma, C., Swinbank, M., Smith, G., **Richard**, J. et 6 coauteurs, *MACSJ1423.8+2404 : Gravitational Lensing by a Massive, Relaxed Cluster of Galaxies at  $z = 0.54$* , 2010, MNRAS, 405, 777
29. Swinbank, M., Smail, I., Longmore, S., Harris, A., Baker, A., de Breuck, C., **Richard**, J. et 15 coauteurs, *The first direct size and luminosity measurements of HII regions within a star-forming galaxy at  $z \sim 2$* , 2010, Nature, 464, 733
30. Jones, T., Swinbank, M., Ellis, R., **Richard**, J., Stark, D., *Resolved Spectroscopy of Gravitationally-Lensed Galaxies : Recovering Coherent Velocity Fields in Sub-Luminous  $z$  2-3 Galaxies*, 2010, MNRAS, 404, 1247
31. Matsuda, Y., **Richard** J. et 8 coauteurs, *A search for galaxies in and around an HI overdense region at  $z=5$* , 2010, MNRAS, 403, 54
32. Ivison, R., Smail, I., Papadopoulos, P., Wold, I., **Richard**, J. et 3 coauteurs, *Gas, dust and stars in the SCUBA galaxy, SMMJ02399-0136 : the EVLA reveals a colossal galactic nursery*, 2010, MNRAS, 404, 198
33. **Richard**, J. et 15 coauteurs, *LoCuSS : First Results from Strong-lensing Analysis of 20 Massive Galaxy Clusters at  $z \sim 0.2$* , 2010, MNRAS, 404, 325
34. **Richard**, J., Kneib, J.P., Limousin, M., Edge, A., Jullo, E., *Abell 370 revisited : refurbished Hubble imaging of the first strong lensing cluster*, 2010, MNRAS, 402, 44
35. Maizy, A., **Richard**, J., De Leo, M., Pello, R., Kneib, J.P., *Looking for the first galaxies : Lensing or blank fields ?*, 2010, A&A, 509, 105
36. Newman, A. et al., *The Distribution of Dark Matter Over Three Decades in Radius in the lensing cluster Abell 611*, 2009, ApJ, 706, 1078
37. Smith, G. et al., *Hubble Space Telescope Observations of a Spectacular New Strong-lensing Galaxy Cluster - MACSJ1149.5+2223 at  $z=0.544$* , 2009, ApJ, 707, 163
38. Knudsen, K., Kneib, J.P., **Richard**, J., Petitpas, G. & Egami, E. *Physical properties and morphology of a newly identified compact  $z=4.04$  submm lensed galaxy in Abell 2218*, 2010, ApJL, 709, 210
39. Swinbank, M., Webb, T., **Richard**, J. et 8 coauteurs, *A spatially resolved map of the kinematics, star formation and stellar mass assembly in a star-forming galaxy at  $z = 4.9$* , 2009, MNRAS 400, 1121
40. Goobar, A., et al., *Near-IR Search for Lensed Supernovae Behind Galaxy Clusters. II. First detection and future prospects*, 2009, A&A 507, 71
41. Stanyshev, V. et al., *Near-IR search for lensed supernovae behind galaxy clusters. I. Observations and transient detection efficiency*, 2009, A&A, 507, 61
42. Marrone, D., Smith, G., **Richard**, J. et 19 coauteurs, *LoCuSS : A Comparison of Sunyaev-Zel'dovich Effect and Gravitational-Lensing Measurements of Galaxy Clusters*, 2009, ApJ 701, 114

43. Limousin, M., Cabanac, R., Gavazzi, R., Kneib, J.P., Motta, M. **Richard**, J., et 18 coauteurs, *A New Window of Exploration in the Mass Spectrum : Strong Lensing by Galaxy Groups in the SL2S*, 2009, A&A, 505, 445
44. Siana, B., Smail, I., Swinbank, M., **Richard**, J., et 6 coauteurs, *Detection of PAH and far-infrared emission from the Cosmic Eye : probing the dust and star formation of Lyman-Break Galaxies*, 2009, ApJ, 698, 1273
45. **Richard**, J., Pei, L., Limousin, M., Jullo, E., Kneib, J.P., *Keck spectroscopic survey of strongly lensed galaxies in Abell 1703 :further evidence for a relaxed,unimodal cluster*, 2009, A&A,498, 37
46. Covone, G., et al., *Gauging the dark matter fraction in a  $L^*$  S0 galaxy at  $z = 0.47$  through gravitational lensing from deep HST/ACS imaging*, 2009, ApJ, 691, 531
47. Stark, D., Swinbank, M., Ellis, R., Smail, I., **Richard**, J. & Dye, S., *Resolving the Formation of the First Galactic Disks*, 2008, Nature, 455, 775
48. **Richard**, J., Stark, D., Ellis, R., George, M., Kneib, J.P., Smith, G.,  *$z > 7$  lensed dropout candidates found in a HST/Spitzer Survey*, 2008, ApJ, 685, 705
49. Limousin, M., **Richard**, J., et 10 coauteurs, *Strong lensing in Abell 1703 : Constraints on the Slope of the Inner Dark Matter Distribution*, 2008, A&A, 489, 23
50. Tu, H., Limousin, L., Fort, B., Shu, C., Sygnet, F., Jullo, E., Kneib, J.P. & **Richard**, J., *Probing the slope of cluster mass profile with gravitational Einstein rings : application to Abell 1689*, 2008, MNRAS, 386, 1169
51. Rigby, J., Marcillac, D., Egami, E., Rieke, G., **Richard**, J., et 7 coauteurs, *Mid-infrared spectroscopy of lensed galaxies at  $1 < z < 3$  : the nature of sources near the MIPS confusion limit*, 2008, ApJ, 675, 262
52. Hempel, A., Schaerer, D., Egami, E., Pelló, R., Wise, M., **Richard**, J., Le Borgne, J.F., Kneib, J.P., *EROs found behind lensing clusters. I. Classification of EROs based on various colour criteria*, 2008, A&A 477, 55
53. Coppin, C. et al., *A detailed study of Gas and Star Formation in a Highly Magnified Lyman Break Galaxy at  $z=3.07$* , 2007, ApJ, 665, 936.
54. Schaerer, D., Hempel, A., Egami, E., Pelló, R., **Richard**, J. et 4 coauteurs, *EROs found behind lensing clusters. II. Stellar populations and dust properties of optical dropout EROs and comparison with related objects*, 2007, A&A, 469, 47 et A&A 476, 97.
55. Limousin, M., **Richard**, J. et 15 coauteurs, *Solving the Abell 1689 puzzle : A combined strong and weak gravitational lensing analysis*, 2007, ApJ, 668, 643.
56. **Richard**, J., et 10 coauteurs, *A statistical study of multiply-imaged systems in the lensing cluster Abell 68*, 2007, ApJ, 663, 10
57. Stark, D., Ellis, R., **Richard**, J., Kneib, J.P., Smith, G., Santos, M., *A Keck survey for Gravitationally-Lensed Lyman  $\alpha$  emitters in the redshift range  $8.5 < z < 10.4$  : new constraints on the contribution of low luminosity sources to cosmic reionization*, 2007, ApJ, 663, 10.



58. Smail, I., Swinbank, M., **Richard**, J. et 8 coauteurs, *A very bright, highly magnified Lyman-break galaxy at  $z=3.07$* , 2007, ApJ, 654, L33
59. Cortese, L., Marcillac, D., **Richard** J. et 8 coauteurs, *The strong transformation of spiral galaxies infalling into massive clusters at  $z \sim 0.2$* , 2007, MNRAS, 376, 157.
60. **Richard**, J., Pelló, R., Schaerer, D., Le Borgne, J., Kneib, J.P., *Constraining the abundance of  $z \gtrsim 6$  star-forming galaxies with deep near-IR images of lensing clusters*, 2006, A&A, 456, 861.
61. Covone, G., Kneib, J.P., Soucail, G., **Richard**, J., Ebeling, H., *VIMOS integral field spectroscopy of the strong lensing cluster Abell 2667*, 2006, A&A, 456, 409.
62. Lamareille, F., Contini, T., Brinchmann, J., Le Borgne, J.F., Charlot, S., **Richard**, J., *Spectrophotometric properties of galaxies at intermediate redshifts II - The Luminosity-Metallicity relation*, 2006, A&A 448, 907.
63. Lamareille, F., Contini, T., Le Borgne, J.F., Brinchmann, J., Charlot, S., **Richard**, J., *Spectrophotometric properties of galaxies at intermediate redshifts I - Sample description, photometric properties and spectral measurements*, 2006, A&A 448, 893.
64. Egami, E., Kneib, J.P., Rieke, G., Ellis, R., **Richard**, J., et 8 coauteurs, *Spitzer and Hubble constraints on the Physical Properties of the  $z \sim 7$  Galaxy strongly lensed by Abell 2218*, 2005, ApJ, 618, L5.
65. Pelló, R., Schaerer, D., **Richard**, J., Le Borgne, J.F., Kneib, J.P., *ISAAC/VLT observations of a lensed galaxy at  $z = 10.0$* , 2004, A&A, 416, L35.
66. Kneib, J.P., Ellis, R., Santos, R. & **Richard**, J., *A probable  $z \sim 7$  galaxy strongly lensed by the rich cluster Abell 2218 : exploring the dark ages*, 2004, ApJ, 607, 697.
67. Santos, M., Ellis, R., Kneib, J.P., **Richard**, J., Kuijken, K., *The abundance of low-luminosity lyman alpha emitters at high redshift*, 2004, ApJ, 606, 683.
68. **Richard**, J., Schaerer, D., Pelló, R., Le Borgne, J., Kneib, J.P., *Discovery of a faint R-band drop-out : a strongly reddened lensed star-forming galaxy at  $z = 1.68$* , 2003, A&A, 412, L57.

## Comptes-rendus de conférences et colloques

1. Pelló, R. et 17 coauteurs, *Extragalactic science with EMIR-GTC*, 2011, SF2A
2. Laporte, N., Pelló, R., Schaerer, D., **Richard**, J., Boone, F., Kneib, J.-P., Egami, E., *High- $z$  galaxies behind the lensing cluster A2667*, 2011, SF2A
3. Verdugo, T., Motta, V., Muñoz, R., Limousin, M., Cabanac, R., **Richard**, J., *Strong lensing, weak lensing, and dynamics in SL2S J02140-0535*, XIII Latin American Regional IAU Meeting, 2011, publié dans Rev.Mex.A.A. CS
4. Tu, H., Limousin, M., Shu, C., Sygnet, J., Jullo, E., Kneib, J.-P., **Richard**, J., *Galaxy evolution : Infrared to millimeter wavelength perspective*, 2010

5. Pelló, R., Maizy, A., **Richard**, J., *Extragalactic science with the FRESNEL imager*, 2011, Experimental Astronomy, Volume 30, Issue 2-3, pp. 195-204
6. Siana, B., Teplitz, H., Chary, R., Colbert, J., Frayer, D., Smail, I., Swinbank, M., **Richard**, J., Stark, D., Ellis, R., 2009, *The Spitzer View of Lensed Lyman Break Galaxies : Testing Star Formation Diagnostics at High Redshift*, 2008, AAS, 21331301
7. Hempel, A., Schaerer, D., **Richard**, J., Egami, E., Pelló, R., *Stellar Population in Extremely Red Galaxies*, 2007, IAU Symposium #241
8. Schaerer, D., Pelló, R., Egami, E., Hempel, A., **Richard**, J., et 5 coauteurs, *News from  $z \sim 6-10$  Galaxy Candidates Found Behind Gravitational Lensing Clusters*, 2007, ASP Conferences, Vol. 380
9. Hempel, A., Schaerer, D., Egami, E., Pelló, R., **Richard**, J., *Extremely Red Galaxies in the Fields of Lensing Clusters*, 2007, ASP Conferences, Vol. 380
10. Stark, D., Ellis, R., **Richard**, J., *The Case for an Abundant Population of Feeble Lyman-alpha Emitting Galaxies at  $z > 8$* , 2007, AAS, 21114302
11. Ellis, R., Stark, D., **Richard**, J., et 3 coauteurs, *New constraints on the co-moving star formation rate in the redshift interval  $6 < z < 10$* , 2007, Highlights of Astronomy, 14, 251
12. Pelló, R., Schaerer, D., **Richard**, J., et 8 coauteurs, *High-redshift lensed galaxies*, 2007, Highlights of Astronomy, 14, 250
13. Pelló, R., **Richard**, J., et 4 coauteurs, *Galaxies at  $z > 7$  : Probing galaxy formation with the new generation of NIR Instruments*, 2007, Rev.MEx.A.A. CS, 29, 132
14. Stark, D., Ellis, R., **Richard**, J., Egami, E., Kneib, J.-P., Smith, G., *Surveys for Lensed Lyman Alpha Galaxies at  $z > 7$* , 2007, AAS, 38, 177
15. Schaerer, D., Hempel, A., Pelló, R., Egami, E., **Richard**, J., Kneib, J.-P., Wise, M., *News from  $z \sim 6-10$  galaxy candidates found behind gravitational lensing clusters*, 2007, IAU #235
16. Hempel, A., Schaerer, D., **Richard**, J., Egami, E., Pelló, R., *Extremely Red Galaxies in Abell 1835*, 2007, IAU #235
17. Cortese, L., Marcillac, D., **Richard**, J. et 8 coauteurs, *The Strong Transformation of Spiral Galaxies Infalling into Massive Clusters at  $z \sim 0.2$* , 2007, IAU #235
18. Schaerer, D., Hempel, A., Pelló, R., Egami, E., **Richard**, J., Kneib, J.-P., Wise, M., *News from  $z \sim 6 - 10$  galaxy candidates found behind gravitational lensing clusters*, 2006, IAU JD7
19. Ellis, R., Stark, D., **Richard**, J., Bunker, A., Egami, E., Kneib, J.-P., *New Constraints on the Comoving Star Formation Rate in the Redshift Interval  $6 < z < 10$* , 2006, IAU JD7
20. **Richard**, J., Brau-Nogué, S., Baratchart, S., Valentin, H., Pelló, R., *The EMIR observing program manager system : optimized slits positioner*, 2006, SPIE

21. Lamareille, F., Contini, T., Le Borgne, J.-F., Brinchmann, J., Charlot, S., **Richard**, J., *Spectrophotometric properties of galaxies : automatic measurement and analysis tools for large surveys*, 2006, AIP Conference Proceedings, Volume 761, 421
22. Lemoine-Busserolle, M., Contini, T., Pelló, R., Le Borgne, J.-F., Kneib, J.-P., **Richard**, J., Lidman, C., *Physical properties of low-luminosity high-redshift lensed galaxies*, 2005, Astrophysics & Space Science Library, Vol. 329, 39
23. Pelló, R., Schaerer, D., **Richard**, J., Le Borgne, J.-F., Kneib, J.-P., *Very high-redshift lensed galaxies*, 2004, IAU 225 : The Impact of Gravitational Lensing on Cosmology, Y. Mellier and G. Meylan, Eds, astroph/0410132
24. Lamareille, F., Contini, T., Le Borgne, J.-F., Brinchmann, J., Charlot, S., **Richard**, J., *Spectrophotometric properties of intermediate-redshift galaxies up to  $z \sim 1$* , 2005, SF2A
25. **Richard**, J., Pelló, R., Schaerer, D., Le Borgne, J.-F., Kneib, J.-P. , *Very high redshift galaxies studied through Gravitational Telescopes*, 2005, SF2A
26. Lamareille, F., Contini, T., Le Borgne, J.-F., Brinchmann, J., Charlot, S., **Richard**, J., *Spectrophotometric properties of galaxies : automatic measurement and analysis tools for large surveys*, SF2A, 2004
27. **Richard**, J., Pelló, R., Contini, T., Brau-Nogué, S., Lucuix, C., *The EMIR observing program manager system science simulator*, "Astronomical Telescopes and Instrumentation" SPIE Conference, June 21-25, 2004, Volume 5493, pp. 373-381
28. Pelló, R., Schaerer, D., **Richard**, J., Le Borgne, J.-F., Kneib, J.-P., *Observing  $z > 7$  sources with the GTC*, II International Workshop on Science with the GTC, February 15-17, 2004, publié dans Rev.Mex.A.A. CS, astro-ph/0404131
29. Pelló, R., **Richard**, J., Schaerer, D., Le Borgne, J.-F., Kneib, J.-P., *Looking for the first stars with the Gravitational Telescope*, SF2A, 2003
30. **Richard**, J., Pelló, R., Schaerer, D., Le Borgne, J.-F., *Ultra-Deep Near-IR Imaging of PopIII Galaxy Candidates*, IAU216 Symposium, July 14-17, 2003.
31. **Richard**, J., Pelló, R., Kneib, J.-P., Schaerer, D., Santos, M., Ellis, R., *Searches for high redshift galaxies using gravitational lensing*, Conférence "Multiwavelength Cosmology", June 17-20, 2003, astroph/0308543.
32. Pelló, R., Contini, T., Lemoine-Busserolle, M., **Richard**, J., Kneib, J.-P., Le Borgne, J.-F., Schaerer, D., Bolzonella, M., *Properties of faint distant galaxies as seen through gravitational telescopes*, Revue donnée à l'école d'hiver "Gravitational Lensing : a unique tool for cosmology", January 2003, A paraître dans ASP Conf. S., eds. D. Valls-Gabaud & J.-P. Kneib, astroph/0305229.

## Rapports techniques

- Pablo López Ramos, Thierry Contini, **Johan Richard**, Roser Pelló, *EMIR Coordinate Operations*, Jan. 2005

- Sylvie Brau-Nogu  , **Johan Richard**, Thierry Contini, Roser Pell  , *EMIR Key-words Dictionary*, Dec. 2004
- Sylvie Brau-Nogu  , **Johan Richard**, Roser Pell  , Christian Lucuix, Thierry Contini, *EMIR Observing Program Management System Use-Case Model*, Dec. 2003

## Communiqués de presse

- NASA/ESA/Keck Obs. : Jean-Paul Kneib, Richard Ellis, Michael Santos, **Johan Richard**, *Hubble and Keck team up to find farthest known galaxy in the Universe*, Feb. 2004
- ESO/A&A/FNRS/CNRS : Roser Pell  , Daniel Schaerer, **Johan Richard**, Jean-François Le Borgne, *VLT Smashes the Record of the Farthest Known Galaxy*, Feb. 2004

# Activités d'enseignement

## Enseignements

- 50 heures de travaux pratiques de physique, Niveau L3, Durham, 2009
- 15 heures de travaux dirigés du cours 'Introduction à la Physique Statistique et applications astrophysiques' at Sup'Aéro (M1 2003)
- 200 heures de support informatique à Sup'Aéro (2001-2002)

Depuis mon arrivée au CRAL, j'enseigne à l'UCBL dans l'unité 'programmation C++' de la filière L2 physique. Je totalise ainsi 45 heures de TD et TP par an. Par ailleurs j'effectue différentes tâches d'enseignement à l'observatoire dans le cadre de mon statut CNAP :

- Interventions auprès de scolaires, dans le cadre de visites de l'observatoire, d'observations, de stages ou de projets ( $\sim 30 - 40$  heures par an).
- Interventions dans des classes de physique de collèges ou lycées ( $\sim 5-10$  heures par an).

## Encadrement de projets de recherche

J'ai encadré ou co-encadré les étudiants suivants depuis ma thèse :

- Christophe Leruste (co-encadrement avec J.P. Kneib) : stagiaire M2 au LATT et à Caltech, 2003, "Detection of High-Redshift Galaxies"
- Grégory Moura (co-encadrement avec J.-P. Kneib et G. Soucail), stagiaire M2 au LATT et à Caltech, 2004, "Mesure des paramètres cosmologiques par la spectroscopie d'images multiples"
- Alexandre Maizy (co-encadrement avec Roser Pelló), stagiaire M2 au LATT, 2006, "Identification et étude multi-longueur d'ondes des galaxies les plus distantes"
- Matthew George (Harvard), étudiant SURF à Caltech (équivalent M2), 2006, "A search for the earliest galaxies"
- Liuyi Pei, étudiante SURF à Caltech (équivalent M1), 2008, "Measuring the mass distribution of galaxy clusters with strong lensing"
- Rachael Livermore, étudiante de thèse en 1ère année à Durham, 2010

- Cyril Trichard, étudiant M2 à l'UCBL, 2011, "Spectroscopie 3D de champs d'amas lentilles avec MUSE"
- Vincent Binet, étudiant M2 à l'UCBL, 2012 (en cours), "Formation et évolution des galaxies sous le microscope gravitationnel"

# Autres Activités

## Bourses et Direction de projets

- PI de la bourse HST # 11160 (cycle 16). *Escape fraction and stellar populations in a highly magnified Lyman-Break Galaxy* : \$24,000
- Admin-PI des bourses HST # 10881 (cycle 15) et # 11312 (cycle 16). *LoCuSS - The Ultimate Gravitational Lensing Survey of Cluster Mass and Substructure* : \$109,000
- PI de 7 programmes d’observation au Keck, et 2 au Palomar
- PI du programme ESO 60.A-9443 (Xshooter-SV)
- PI du programme ESO 85.B-0848 (SINFONI)
- PI du programme ESO 86.B-0603 (FORS)
- PI du programme ESO 87.B-0560 (FORS)
- PI du programme ESO 88.A-0571(FORS)
- PI du programme JCMT/SCUBA2 M09BI136

## Tâches de service

En temps qu’astronome-adjoint, une partie importante de mes activités consiste à effectuer des *tâches de service* d’observation (SO) pilotées au niveau national par l’INSU. Ma tâche de service principale concerne l’instrumentation sur les grands télescopes (SO2), avec une grande dominance sur le projet MUSE (PI : Roland Bacon) qui se trouve en phase finale de construction au CRAL avant sa mise en place sur le VLT.

## Aide à la préparation du temps garanti sur MUSE/VLT

Dans le cadre des simulations effectuées pour aider la préparation du temps garanti sur MUSE, je participe au développement d’une partie des simulations en collaboration



avec Roland Bacon, notamment ce qui concerne l'utilisation de galaxies comme lentilles gravitationnelles. Je procède également au suivi des programmes scientifiques du temps garanti et leur validation sur ces données simulées.

## **Soutien scientifique au développement software de MUSE**

En collaboration avec l'équipe d'informatique scientifique du CRAL (notamment Arlette Pécontal, Laure Piqueras) je participe à la conception, à la validation et aux tests de différents sous-systèmes :

- Les outils de préparation d'observation (MUSEPS)
- Le slow-guiding system (SGS)
- Le plan de calibration de l'instrument
- La définition et la validation des templates
- Les interfaces graphiques de MUSE
- La plate-forme de développement et d'analyse de données MUSE (MPDAF)

Je suis membre de la 'global test team' de MUSE qui procédera aux tests complets de l'instrument jusqu'à la phase de commissioning.

## **Techniques d'analyse des données MUSE**

Dans le cadre de l'ANR DAHLIA, différents groupes collaborent à la frontière entre les domaines astrophysique et traitement du signal pour améliorer les techniques de détection et d'analyse des futures données MUSE. Des développements sont effectués à Nice, Strasbourg, Toulouse et Grenoble, mais aussi à Potsdam dans le consortium MUSE. Je m'occupe de l'évaluation des techniques utilisées sur les données MUSE simulées et, en collaboration avec Roland Bacon, je participe à leur validation.

# Bibliographie

- Allam, S. S., Tucker, D. L., Lin, H., et al. 2007, *The 8 O’Clock Arc : A Serendipitous Discovery of a Strongly Lensed Lyman Break Galaxy in the SDSS DR4 Imaging Data*, ApJ, 662, L51
- Altieri, B., Berta, S., Lutz, D., et al. 2010, *Herschel deep far-infrared counts through Abell 2218 cluster-lens*, A&A, 518, L17
- Bacon, R., Accardo, M., Adjali, L., et al. 2010, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 7735, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series
- Baker, A. J., Tacconi, L. J., Genzel, R., Lehnert, M. D., & Lutz, D. 2004, *Molecular Gas in the Lensed Lyman Break Galaxy cB58*, ApJ, 604, 125
- Belokurov, V., Evans, N. W., Moiseev, A., et al. 2007, *The Cosmic Horseshoe : Discovery of an Einstein Ring around a Giant Luminous Red Galaxy*, ApJ, 671, L9
- Benson, A. J. 2010, *Galaxy formation theory*, Physics Reports, 495, 33
- Bian, F., Fan, X., Bechtold, J., et al. 2010, *LBT/LUCIFER Observations of the  $z \sim 2$  Lensed Galaxy J0900+2234*, ApJ, 725, 1877
- Bouwens, R. J., Illingworth, G. D., Blakeslee, J. P., & Franx, M. 2006, *Galaxies at  $z \sim 6$  : The UV Luminosity Function and Luminosity Density from 506 HUDF, HUDF Parallel ACS Field, and GOODS i-Dropouts*, ApJ, 653, 53
- Bouwens, R. J., Illingworth, G. D., Bradley, L. D., et al. 2009,  *$z \sim 7-10$  Galaxies Behind Lensing Clusters : Contrast with Field Search Results*, ApJ, 690, 1764
- Bouwens, R. J., Illingworth, G. D., Franx, M., & Ford, H. 2008,  *$z \sim 7-10$  Galaxies in the HUDF and GOODS Fields : UV Luminosity Functions*, ApJ, 686, 230
- Bradač, M. & et al. 2008, *Revealing the Properties of Dark Matter in the Merging Cluster MACS J0025.4-1222*, ApJ, 687, 959
- Broadhurst, T., Benítez, N., Coe, D., et al. 2005, *Strong-Lensing Analysis of A1689 from Deep Advanced Camera Images*, ApJ, 621, 53

- Broadhurst, T. J. & Barkana, R. 2008, *Large Einstein radii : a problem for  $\Lambda$ CDM*, MNRAS, 390, 1647
- Campusano, L. E., Pelló, R., Kneib, J., et al. 2001, *VLT spectroscopy of galaxies lensed by the AC 114 cluster : Implications for the mass model and the study of low-luminosity galaxies at high-redshift*, A&A, 378, 394
- Clowe, D., Bradač, M., Gonzalez, A. H., et al. 2006, *A Direct Empirical Proof of the Existence of Dark Matter*, ApJ, 648, L109
- Combes, F., Rex, M., Rawle, T. D., et al. 2012, *A bright  $z = 5.2$  lensed submillimeter galaxy in the field of Abell 773. HLSJ091828.6+514223*, A&A, 538, L4
- Covone, G., Kneib, J.-P., Soucail, G., et al. 2006, *VIMOS-IFU survey of  $z \sim 0.2$  massive galaxy clusters. I. Observations of the strong lensing cluster Abell 2667*, A&A, 456, 409
- Cresci, G., Mannucci, F., Maiolino, R., et al. 2010, *Gas accretion as the origin of chemical abundance gradients in distant galaxies*, Nature, 467, 811
- Dye, S., Smail, I., Swinbank, A. M., Ebeling, H., & Edge, A. C. 2007, *Separation of the visible and dark matter in the Einstein ring LBGJ213512.73-010143*, MNRAS, 379, 308
- Ebbels, T. M. D., Le Borgne, J., Pello, R., et al. 1996, *Identification of a gravitationally lensed  $z=2.515$  star-forming galaxy*, MNRAS, 281, L75
- Egami, E., Kneib, J.-P., Rieke, G. H., et al. 2005, *Spitzer and Hubble Space Telescope Constraints on the Physical Properties of the  $z \sim 7$  Galaxy Strongly Lensed by A2218*, ApJ, 618, L5
- Egami, E., Rex, M., Rawle, T. D., et al. 2010, *The Herschel Lensing Survey (HLS) : Overview*, A&A, 518, L12
- Ellis, R., Santos, M. R., Kneib, J.-P., & Kuijken, K. 2001, *A Faint Star-forming System Viewed through the Lensing Cluster Abell 2218 : First Light at  $z \sim 5.6$  ?*, ApJ, 560, L119
- Erb, D. K., Shapley, A. E., Steidel, C. C., et al. 2003,  *$H\alpha$  Spectroscopy of Galaxies at  $z > 2$  : Kinematics and Star Formation*, ApJ, 591, 101
- Erb, D. K., Steidel, C. C., Shapley, A. E., et al. 2006a,  *$H\alpha$  Observations of a Large Sample of Galaxies at  $z \sim 2$  : Implications for Star Formation in High-Redshift Galaxies*, ApJ, 647, 128
- . 2006b, *The Stellar, Gas, and Dynamical Masses of Star-forming Galaxies at  $z \sim 2$* , ApJ, 646, 107
- Förster Schreiber, N. M., Genzel, R., Bouché, N., et al. 2009, *The SINS Survey : SINFONI Integral Field Spectroscopy of  $z \sim 2$  Star-forming Galaxies*, ApJ, 706, 1364

- Förster Schreiber, N. M., Genzel, R., Lehnert, M. D., et al. 2006, *SINFONI Integral Field Spectroscopy of  $z \sim 2$  UV-selected Galaxies : Rotation Curves and Dynamical Evolution*, ApJ, 645, 1062
- Franx, M., Illingworth, G. D., Kelson, D. D., van Dokkum, P. G., & Tran, K.-V. 1997, *A Pair of Lensed Galaxies at  $z=4.92$  in the Field of CL 1358+62*, ApJ, 486, L75
- Frye, B., Broadhurst, T., & Benítez, N. 2002, *Spectral Evidence for Widespread Galaxy Outflows at  $z > 4$* , ApJ, 568, 558
- Frye, B. L., Coe, D., Bowen, D. V., et al. 2007, *The Sextet Arcs : A Strongly Lensed Lyman Break Galaxy in the ACS Spectroscopic Galaxy Survey toward Abell 1689*, ApJ, 665, 921
- Fynbo, J. P. U., Ledoux, C., Möller, P., Thomsen, B., & Burud, I. 2003, *The Building the Bridge survey for  $z = 3$  Lyalpha emitting galaxies . I. Method and first results*, A&A, 407, 147
- Fynbo, J. U., Möller, P., & Thomsen, B. 2001, *Probing the faint end of the Galaxy luminosity function at  $z=3$  with Lyalpha emission*, A&A, 374, 443
- Genzel, R., Burkert, A., Bouché, N., et al. 2008, *From Rings to Bulges : Evidence for Rapid Secular Galaxy Evolution at  $z \sim 2$  from Integral Field Spectroscopy in the SINS Survey*, ApJ, 687, 59
- Genzel, R., Tacconi, L. J., Eisenhauer, F., et al. 2006, *The rapid formation of a large rotating disk galaxy three billion years after the Big Bang*, Nature, 442, 786
- Golse, G. & Kneib, J.-P. 2002, *Pseudo elliptical lensing mass model : Application to the NFW mass distribution*, A&A, 390, 821
- Hasinger, G., Giacconi, R., Gunn, J. E., et al. 1998, *The ROSAT Deep Survey. IV. A distant lensing cluster of galaxies with a bright arc*, A&A, 340, L27
- Hopkins, P. F., Quataert, E., & Murray, N. 2011, *Self-regulated star formation in galaxies via momentum input from massive stars*, MNRAS, 417, 950
- Jones, T., Ellis, R., Jullo, E., & Richard, J. 2010a, *Measurement of a Metallicity Gradient in a  $z = 2$  Galaxy : Implications for Inside-out Assembly Histories*, ApJ, 725, L176
- Jones, T., Swinbank, A. M., Ellis, R. S., Richard, J., & Stark, D. P. 2010b, *Resolved spectroscopy of gravitationally lensed galaxies : recovering coherent velocity fields in subluminal  $z \sim 2-3$  galaxies*, MNRAS, 404, 1247
- Jullo, E. & Kneib, J.-P. 2009, *Multiscale cluster lens mass mapping - I. Strong lensing modelling*, MNRAS, 395, 1319

- Jullo, E., Kneib, J.-P., Limousin, M., et al. 2007, *A Bayesian approach to strong lensing modelling of galaxy clusters*, New Journal of Physics, 9, 447
- Kneib, J.-P. 1993, Ph.D. Thesis
- Kneib, J.-P., Ellis, R. S., Smail, I., Couch, W. J., & Sharples, R. M. 1996, *Hubble Space Telescope Observations of the Lensing Cluster Abell 2218*, ApJ, 471, 643
- Law, D. R., Steidel, C. C., Erb, D. K., et al. 2007, *Integral Field Spectroscopy of High-Redshift Star-forming Galaxies with Laser-guided Adaptive Optics : Evidence for Dispersion-dominated Kinematics*, ApJ, 669, 929
- . 2009, *The Kiloparsec-scale Kinematics of High-redshift Star-forming Galaxies*, ApJ, 697, 2057
- Law, D. R., Steidel, C. C., Shapley, A. E., et al. 2012, *An HST/WFC3-IR Morphological Survey of Galaxies at  $z = 1.5-3.6$ . I. Survey Description and Morphological Properties of Star-forming Galaxies*, ApJ, 745, 85
- Lemoine-Busserolle, M., Contini, T., Pelló, R., et al. 2003, *Physical properties of two low-luminosity  $\{z \sim 1.9\}$  galaxies behind the lensing cluster AC 114*, A&A, 397, 839
- Limousin, M., Ebeling, H., Ma, C., et al. 2010, *MACS J1423.8+2404 : gravitational lensing by a massive, relaxed cluster of galaxies at  $z = 0.54$* , MNRAS, 405, 777
- Limousin, M., Ebeling, H., Richard, J., et al. 2011, *Strong Lensing by a Node of the Cosmic Web. The Core of MACS J0717.5+3745 at  $z=0.55$* , ArXiv e-prints
- Limousin, M., Richard, J., Jullo, E., et al. 2007, *Combining Strong and Weak Gravitational Lensing in Abell 1689*, ApJ, 668, 643
- Limousin, M., Richard, J., Kneib, J.-P., et al. 2008, *Strong lensing in Abell 1703 : constraints on the slope of the inner dark matter distribution*, A&A, 489, 23
- Lin, H., Buckley-Geer, E., Allam, S. S., et al. 2009, *Discovery of a Very Bright, Strongly Lensed  $z = 2$  Galaxy in the SDSS DR5*, ApJ, 699, 1242
- Maiolino, R., Nagao, T., Grazian, A., et al. 2008, *AMAZE. I. The evolution of the mass-metallicity relation at  $z > 3$* , A&A, 488, 463
- Mannucci, F., Cresci, G., Maiolino, R., Marconi, A., & Gnerucci, A. 2010, *A fundamental relation between mass, star formation rate and metallicity in local and high-redshift galaxies*, MNRAS, 408, 2115
- Mannucci, F., Cresci, G., Maiolino, R., et al. 2009, *LSD : Lyman-break galaxies Stellar populations and Dynamics - I. Mass, metallicity and gas at  $z \sim 3.1$* , MNRAS, 398, 1915

- Mellier, Y., Fort, B., & Kneib, J.-P. 1993, *The dark matter distribution in MS 2137-23 from the modeling of the multiple arc systems*, ApJ, 407, 33
- Mosleh, M., Williams, R. J., Franx, M., & Kriek, M. 2011, *The Evolution of the Mass-Size Relation to  $z = 3.5$  for UV-bright Galaxies and Submillimeter Galaxies in the GOODS-North Field*, ApJ, 727, 5
- Nagao, T., Maiolino, R., & Marconi, A. 2006, *Gas metallicity diagnostics in star-forming galaxies*, A&A, 459, 85
- Navarro, J. F., Frenk, C. S., & White, S. D. M. 1997, *A Universal Density Profile from Hierarchical Clustering*, ApJ, 490, 493
- Nilsson, K. K., Møller, P., Möller, O., et al. 2007, *A multi-wavelength study of  $z = 3.15$  Lyman- $\alpha$  emitters in the GOODS South Field*, A&A, 471, 71
- Orban de Xivry, G. & Marshall, P. 2009, *An atlas of predicted exotic gravitational lenses*, MNRAS, 399, 2
- Pagel, B. E. J., Edmunds, M. G., Blackwell, D. E., Chun, M. S., & Smith, G. 1979, *On the composition of H II regions in southern galaxies. I - NGC 300 and 1365*, MNRAS, 189, 95
- Papovich, C., Rudnick, G., Le Floch, E., et al. 2007, *Spitzer Mid- to Far-Infrared Flux Densities of Distant Galaxies*, ApJ, 668, 45
- Peng, C. Y., Ho, L. C., Impey, C. D., & Rix, H.-W. 2002, *Detailed Structural Decomposition of Galaxy Images*, AJ, 124, 266
- Pettini, M., Shapley, A. E., Steidel, C. C., et al. 2001, *The Rest-Frame Optical Spectra of Lyman Break Galaxies : Star Formation, Extinction, Abundances, and Kinematics*, ApJ, 554, 981
- Pettini, M., Steidel, C. C., Adelberger, K. L., Dickinson, M., & Giavalisco, M. 2000, *The Ultraviolet Spectrum of MS 1512-CB58 : An Insight into Lyman-Break Galaxies*, ApJ, 528, 96
- Postman, M., Coe, D., Benítez, N., et al. 2012, *The Cluster Lensing and Supernova Survey with Hubble : An Overview*, ApJS, 199, 25
- Queyrel, J., Contini, T., Kissler-Patig, M., et al. 2012, *MASSIV : Mass Assembly Survey with SINFONI in VVDS. III. Evidence for positive metallicity gradients in  $z \sim 1.2$  star-forming galaxies*, A&A, 539, A93
- Reddy, N. A., Steidel, C. C., Fadda, D., et al. 2006, *Star Formation and Extinction in Redshift  $z \sim 2$  Galaxies : Inferences from Spitzer MIPS Observations*, ApJ, 644, 792

- Renn, J., Sauer, T., & Stachel, J. 1997, *The origin of gravitational lensing : a postscript to Einstein's 1936 Science paper.*, Science, 275, 184
- Rex, M., Rawle, T. D., Egami, E., et al. 2010, *The far-infrared/submillimeter properties of galaxies located behind the Bullet cluster*, A&A, 518, L13
- Richard, J., Jones, T., Ellis, R., et al. 2011a, *The emission line properties of gravitationally lensed  $1.5 < z < 5$  galaxies*, MNRAS, 413, 643
- Richard, J., Kneib, J., Limousin, M., Edge, A., & Jullo, E. 2010a, *Abell 370 revisited : refurbished Hubble imaging of the first strong lensing cluster*, MNRAS, 402, L44
- Richard, J., Kneib, J.-P., Ebeling, H., et al. 2011b, *Discovery of a possibly old galaxy at  $z = 6.027$ , multiply imaged by the massive cluster Abell 383*, MNRAS, 414, L31
- Richard, J., Kneib, J.-P., Jullo, E., et al. 2007, *A Statistical Study of Multiply Imaged Systems in the Lensing Cluster Abell 68*, ApJ, 662, 781
- Richard, J., Pei, L., Limousin, M., Jullo, E., & Kneib, J. P. 2009, *Keck spectroscopic survey of strongly lensed galaxies in Abell 1703 : further evidence of a relaxed, unimodal cluster*, A&A, 498, 37
- Richard, J., Pelló, R., Schaerer, D., Le Borgne, J.-F., & Kneib, J.-P. 2006, *Constraining the population of  $6 < z < 10$  star-forming galaxies with deep near-IR images of lensing clusters*, A&A, 456, 861
- Richard, J., Smith, G. P., Kneib, J., et al. 2010b, *LoCuSS : first results from strong-lensing analysis of 20 massive galaxy clusters at  $z = 0.2$* , MNRAS, 404, 325
- Richard, J., Stark, D. P., Ellis, R. S., et al. 2008, *A Hubble and Spitzer Space Telescope Survey for Gravitationally Lensed Galaxies : Further Evidence for a Significant Population of Low-Luminosity Galaxies beyond  $z=7$* , ApJ, 685, 705
- Rigby, J. R., Marcillac, D., Egami, E., et al. 2008, *Mid-Infrared Spectroscopy of Lensed Galaxies at  $1 < z < 3$  : The Nature of Sources Near the MIPS Confusion Limit*, ApJ, 675, 262
- Santos, M. R., Ellis, R. S., Kneib, J.-P., Richard, J., & Kuijken, K. 2004, *The Abundance of Low-Luminosity Ly $\alpha$  Emitters at High Redshift*, ApJ, 606, 683
- Schneider, P., Ehlers, J., & Falco, E. E. 1992, *Gravitational Lenses*, ed. Schneider, P., Ehlers, J., & Falco, E. E.
- Shapley, A. E. 2011, *Physical Properties of Galaxies from  $z = 2-4$* , Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 49, 525
- Shapley, A. E., Steidel, C. C., Pettini, M., & Adelberger, K. L. 2003, *Rest-Frame Ultra-violet Spectra of  $z \sim 3$  Lyman Break Galaxies*, ApJ, 588, 65



- Shen, S., Mo, H. J., White, S. D. M., et al. 2003, *The size distribution of galaxies in the Sloan Digital Sky Survey*, MNRAS, 343, 978
- Siana, B., Teplitz, H. I., Chary, R.-R., Colbert, J., & Frayer, D. T. 2008, *Spitzer Observations of the  $z = 2.73$  Lensed Lyman Break Galaxy : MS 1512-cB58*, ApJ, 689, 59
- Smail, I., Swinbank, A. M., Richard, J., et al. 2007, *A Very Bright, Highly Magnified Lyman Break Galaxy at  $z = 3.07$* , ApJ, 654, L33
- Smith, G. P., Ebeling, H., Limousin, M., et al. 2009, *Hubble Space Telescope Observations of a Spectacular New Strong-Lensing Galaxy Cluster : MACS J1149.5+2223 at  $z = 0.544$* , ApJ, 707, L163
- Soucail, G., Mellier, Y., Fort, B., Mathez, G., & Cailloux, M. 1988, *The giant arc in A 370 - Spectroscopic evidence for gravitational lensing from a source at  $Z = 0.724$* , A&A, 191, L19
- Stark, D. P., Ellis, R. S., & Ouchi, M. 2011, *Keck Spectroscopy of Faint  $3 < z < 7$  Lyman Break Galaxies : A High Fraction of Line Emitters at Redshift Six*, ApJ, 728, L2
- Stark, D. P., Swinbank, A. M., Ellis, R. S., et al. 2008, *The formation and assembly of a typical star-forming galaxy at redshift  $z \sim 3$* , Nature, 455, 775
- Steidel, C. C., Adelberger, K. L., Giavalisco, M., Dickinson, M., & Pettini, M. 1999, *Lyman-Break Galaxies at  $z > 4$  and the Evolution of the Ultraviolet Luminosity Density at High Redshift*, ApJ, 519, 1
- Steidel, C. C., Adelberger, K. L., Shapley, A. E., et al. 2003, *Lyman Break Galaxies at Redshift  $z \sim 3$  : Survey Description and Full Data Set*, ApJ, 592, 728
- Steidel, C. C., Bogosavljević, M., Shapley, A. E., et al. 2011, *Diffuse Ly $\alpha$  Emitting Halos : A Generic Property of High-redshift Star-forming Galaxies*, ApJ, 736, 160
- Swinbank, A. M., Papadopoulos, P. P., Cox, P., et al. 2011, *The Interstellar Medium in Distant Star-forming Galaxies : Turbulent Pressure, Fragmentation, and Cloud Scaling Relations in a Dense Gas Disk at  $z = 2.3$* , ApJ, 742, 11
- Swinbank, A. M., Smail, I., Longmore, S., et al. 2010, *Intense star formation within resolved compact regions in a galaxy at  $z = 2.3$* , Nature, 464, 733
- Swinbank, A. M., Webb, T. M., Richard, J., et al. 2009, *A spatially resolved map of the kinematics, star formation and stellar mass assembly in a star-forming galaxy at  $z = 4.9$* , MNRAS, 400, 1121
- Teplitz, H. I., McLean, I. S., Becklin, E. E., et al. 2000, *The Rest-Frame Optical Spectrum of MS 1512-CB58*, ApJ, 533, L65

- Umetsu, K. & Broadhurst, T. 2008, *Combining Lens Distortion and Depletion to Map the Mass Distribution of A1689*, ApJ, 684, 177
- Yee, H. K. C., Ellingson, E., Bechtold, J., Carlberg, R. G., & Cuillandre, J.-C. 1996, *A Proto-Galaxy Candidate at  $z=2.7$  Discovered by its Young Stellar Population*, AJ, 111, 1783
- Yuan, T.-T., Kewley, L. J., Swinbank, A. M., Richard, J., & Livermore, R. C. 2011, *Metallicity Gradient of a Lensed Face-on Spiral Galaxy at Redshift 1.49*, ApJ, 732, L14
- Zitrin, A., Broadhurst, T., Umetsu, K., et al. 2010, *Full lensing analysis of Abell 1703 : comparison of independent lens-modelling techniques*, MNRAS, 408, 1916